M. S. SOMINSKI

SEMICONDUCTOARE ŞI APLICAŢIILE LOR TEHNICE

EDITURA TEHNICA



M. S. SOMINSKI

SEMICONDUCTOARE
ŞI
APLICAŢIILE LOR TEHNICE

TRADUCERE DIN LIMBA RUSĂ



EDITURA TEHNICĂ
BUCUREŞTI-1959

În carte sînt expuse, într-o formă elementară și accesibilă, noțiunile fundamentale de fizică semiconductoarelor, necesare pentru înțelegerea fenomenelor care au loc în toate tipurile posibile de aparate cu semiconductoare. Se descriu aceste aparate și se prezintă aplicațiile lor practice în diferite domenii ale științei și tehnicii.

Lucrarea se adresează unor cercuri largi de cititori.

М. С. Соминский
ПОЛУПРОВОДНИКИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ
Лениздат
1958

INTRODUCERE

Pînă acum vreo treizeci de ani, aproape nimeni nu auzise despre uimitoarea clasă de substanțe care au primit numele modest de „semiconductoare". Cîțiva fizicieni de-abia începuseră să se ocupe de studiul amănunțit al proprietăților fizice și mai ales electrice ale acestor substanțe, fără a-și închipui cîtuși de puțin ce uriașe posibilități ascund în ele.

Pas cu pas, oamenii de știință au pătruns însă în tainele semiconductoarelor, au găsit noi legi fizice, au creat noi substanțe semiconductoare și au descoperit noi fenomene, care i-au surprins pe cei ce le-au studiat pentru prima dată. În mai bine de trei decenii, una dintre cele mai tinere ramuri ale științei, fizica semiconductoarelor, a înregistrat succese remarcabile. În prezent, se pare, nu există nici un domeniu al tehnicii în care semiconductoarele să nu fie folosite într-o măsură mai mare sau mai mică. Rolul, importanța și posibilitățile pe care le oferă sînt greu de apreciat la justa lor valoare. Recent, într-o cuvîntare a sa, eminentul savant sovietic, academicianul A. F. Ioffe, a spus pe bună dreptate: „Fizica modernă cunoaște două domenii de la care ne așteptăm la cele mai mari progrese în ce privește condițiile materiale de viață — nucleul atomic și semiconductoarele".

Cu ajutorul semiconductoarelor au fost realizate numeroase și diverse aparate ce îndeplinesc o sumedenie de funcțiuni. Aceste aparate produc frig, înmagazinează energie magnetică, protejează liniile de înaltă tensiune împotriva descărcărilor electrice dăunătoare din atmosferă, preschimbă în lumină radiații invizibile pentru ochiul omenesc, transformă energia termică și radiantă direct în energie electrică, redresează curenții alternativi, amplifică oscilațiile electromagnetice slabe, măsoară umiditatea aerului, măsoară temperatura, numără particulele atomice elementare, transformă nemijlocit energia radiațiilor nucleare în energie electrică,

detectează obiecte încălzite, aflate la distanţă, şi îndeplinesc multe alte funcţiuni.

În faţa semiconductoarelor se deschid nemărginite perspective. Nu e de mirare, deci, că an de an se măreşte numărul de cercetători care îşi dăruiesc timpul, cunoştinţele şi forţele creatoare, studiului acestei extraordinare clase de substanţe.

Dar ce sînt semiconductoarele şi în ce constă particularităţile lor? Mai întîi de toate, menţionăm că însăşi această denumire are o provenienţă pur istorică şi nu dezvăluie esenţa fizică a categoriei de substanţe care ne interesează. Prin manifestările lor pur exterioare, semiconductoarele ocupă un loc intermediar între metale, care posedă o conductivitate electrică foarte mare, şi materialele izolante, a căror rezistivitate poate atinge valori uriaşe pînă la $10^{20}\Omega$ cm. Dacă conductivitatea diferitelor metale este cuprinsă aproximativ între limitele $6 \cdot 10^3$ şi $6 \cdot 6 \cdot 10^5 \Omega^{-3} cm^{-1}$, valoarea conductivităţii semiconductoarelor variază aproximativ de la 10^4 pînă la $10^{-10}\Omega^{-1}cm^{-1}$. Proprietăţile surprinzătoare ale semiconductoarelor nu provin însă cîtuşi de puţin de la faptul că ele nu conduc electricitatea nici atît de bine ca metalele, nici atît de rău ca materialele izolante, ci se datoresc altor cauze fizice, mult mai profunde, despre care se va vorbi amănunţit în cele ce urmează.

Semiconductoarele alcătuiesc o clasă de substanţe foarte numeroase şi răspîndite în natură: practic toţi oxizii de metale, sulfurile, seleniurile, telururile, unele săruri metalice duble, triple sau cuadruple, precum şi o serie de elemente simple cum sînt carbonul (sub formă de grafit), telurul, borul, siliciul, fosforul, germaniul, arsenul, seleniul şi forma alotropică cenuşie a cositorului. După expresia plastică a academicianului A. P. Ioffe, „semiconductoarele reprezintă aproape întreaga lume anorganică ce ne înconjoară".

Fizicienii şi chimiştii, metalurgiştii şi geologii au studiat timp îndelungat diferitele proprietăţi ale compuşilor chimici semiconductori, cu excepţia proprietăţilor electrice. Iată de ce această minunată clasă de substanţe a rămas de fapt în umbră şi îi interesa pe oamenii de ştiinţa numai într-o singură privinţă: obţinerea, din compuşii chimici, a unor metale şi metaloizi în stare pură. Acum treizeci de ani, însă, lucrurile s-au schimbat radical şi, în prezent, proprietăţile electrice ale semiconductoarelor sînt studiate intens de fizicieni şi chimişti din majoritatea ţărilor.

În Uniunea Sovietică, studiul sistematic al semiconductoarelor a fost inițiat la Leningrad. Chiar de la începutul deceniului al treilea al secolului nostru, academicianul A. P. Ioffe, conducătorul uneia dintre cele mai mari școli de fizicieni, a strîns în jurul lui un grup de tineri talentați și a purces la studierea, sub toate aspectele, a proprietăților fizice ale substanțelor semiconductoare. Lucrările lui A. P. Ioffe și ale elevilor și colaboratorilor lui au dat rezultate valoroase atît din punct de vedere practic, cît și teoretic. De atunci, cercetările de fizica semiconductoarelor s-au extins și în momentul de față ele nu atrg numai atenția oamenilor de știință din Leningrad. Fizicienii din Moscova, Kiev, Vilnius, Harkov, Erevan, Saransk și alte orașe, se străduiesc cu perseverență să rezolve cele mai importante probleme ale fizicii semiconductoarelor. Și dacă în ultimii ani au fost obținute uriașe succese, trebuie să se presupună că și în viitor ne putem aștepta la nu mai puține reușite. Secretul tuturor acestor realizări este rezultatul a doi factori esențiali: proprietățile fizice excepționale ale semiconductoarelor și munca colosală depusă de un mare număr de fizicieni, chimiști și tehnicieni, care au reușit să descopere și să folosească aceste proprietăți. Această activitate de proporții într-adevăr gigantice se extinde pe zi ce trece. În fiecare an, tot mai numeroși sînt cercetătorii, inginerii și tehnicienii atrași în orbita ei și sîntem îndreptățiți să credem că tocmai în aceasta constă chezășia viitoarelor succese ale fizicii semiconductoarelor, care ocupă un loc de frunte în progresul tehnic.

CAPITOLUL I

PROPRIETĂȚILE ELECTRICE ALE SEMICONDUCTOARELOR

1. STRUCTURA ATOMULUI

Inainte de a proceda direct la studiul proprietăţilor fizice ale semiconductoarelor, este necesar să spunem cîteva cuvinte despre structura atomului.

Ce este atomul?

Atomul, ceea ce în limba greacă înseamnă „indivizibil", constituie cea mai mică particulă dintr-un element chimic. Prin nici un fel de forțe și mijloace nu este posibil ca această particulă minusculă să fie împărțită nici măcar în două alte părticele, astfel ca fiecare să reprezinte o bucățică din elementul inițial respectiv.

Din atomi sînt alcătuite toate elementele chimice: hidrogenul, oxigenul, azotul, clorul, fluorul, fierul, cuprul, wolframul, uraniul, curiul, einsteiniul, mendeleieviul și multe altele, în total 102 elemente cunoscute pînă acum.

In 1869, D. I. Mendeleev a descoperit legea periodicității proprietăților elementelor. El a ordonat atomii într-un sistem și a așezat toate elementele în uimitoarea lui tabelă, care reflectă clar particularitățile și proprietățile fizico-chimice ale acestora.

In natură există însă nu numai substanțe simple, elementele chimice, dar și compuși chimici complecși formați din elemente. Astfel, de exemplu, apa este un compus format din hidrogen și oxigen.

Cea mai mică părticică posibilă din orice substanță compusă se numește moleculă și este formată întotdeauna din anumiți atomi. Prin urmare, atomii diferitelor elemente sînt capabili să se grupeze în particule mai voluminoase și mai complexe — moleculele. Molecula de apă este alcătuită din doi atomi de hidrogen și un atom de oxigen. O moleculă de

acid sulfuric este formată din doi atomi de hidrogen, un atom de sulf şi patru atomi de oxigen. O moleculă de sare de bucătărie se compune din numai doi atomi: un atom de sodiu şi unul de clor. Din alcătuirea unei molecule de acid azotic fac parte cinci atomi: un atom de hidrogen, un atom de azot, şi trei atomi de oxigen. Există molecule încă şi mai complicate, a căror structură este formată din zeci, sute şi chiar mii de atomi.

Dar este oare atomul într-adevăr indivizibil, aşa cum au crezut vechii greci şi chiar majoritatea învăţaţilor din secolul al XIX-lea? La această întrebare ştiinţa a răspuns negativ. Atomul s-a dovedit a fi un sistem complicat, alcătuit din particule încă şi mai mici.

În prezent, taina structurii atomului — această „piatră unghiulară a universului" — a fost descoperită. Se ştie astăzi că atomul oricărui element chimic se compune dintr-un nucleu greu central şi din mai mulţi electroni care îl înconjoară. Masa principală a atomului este concentrată în nucleul lui. Cel mai uşor nucleu este acela al atomului de hidrogen, care este de 1840 ori mai greu decît electronul. Nucleul posedă o sarcină electrică pozitivă. Electronii sînt însă purtători de electricitate negativă. Nucleele încărcate pozitiv ale diferitelor elemente se deosebesc între ele prin masa şi valoarea sarcinii lor electrice. Electronii nu se deosebesc prin nimic unul de altul: electronul „de oxigen" este absolut identic cu electronul „de platină", „de aur", „de hidrogen". Toţi aceşti electroni au una şi aceeaşi masă şi o sarcină electrică negativă absolut identică.

Dacă în atomii fiecărui element există întotdeauna numai un singur nucleu, în schimb numărul de electroni este diferit. Cu cît atomul este mai greu, cu atît în structura lui intră un număr mai mare de electroni. În atomul de hidrogen există numai un singur electron, în atomul de oxigen 8, în atomul de argint 47, în atomul de uraniu 92, iar în atomul de nobeliu *) — cel mai greu dintre elementele cunoscute — 102 electroni.

Deoarece nucleul şi electronii sînt încărcaţi cu electricitate de nume diferit, ei se atrag reciproc. Aceste forţe de atracţie depind de distanţele dintre electroni şi nucleu. Odată cu creşterea acestei distanţe, forţele de atracţie slăbesc. Elec-

---

*) Elementul nobeliu, cu numărul de ordine 102, a fost descoperit în martie 1957. Simbolul lui este No.

tronii nu „cad“ pe nucleu, ci se află față de el la o anumită distanță, bine determinată. Această stabilitate a electronilor se explică prin faptul că ei se rotesc neîntrerupt în jurul nucleului.

In atomul fiecărui element, electronii sînt aranjați în „etaje“ formînd sistemul de „pături“ (sau orbite) electronice. Pe fiecare orbită se pot afla numai un număr strict determinat de electroni, care nu poate fi depășit. Prima orbită, și cea mai apropiată de nucleu, orbita K, poate avea numai doi electroni, a doua orbită notată cu litera L, 8 electroni, a treia orbită (M) 18 electroni, iar a patra (N) 32 electroni. Orbitele nu sînt întotdeauna ocupate în întregime cu numărul de electroni pe care ele îi pot avea. De cele mai multe ori orbitele exterioare sînt incomplete. Orbitele O, P și Q nu sînt niciodată completate cu toți electronii pe care-i pot primi.

Sarcina globală a tuturor electronilor atomului este precis egală cu sarcina nucleului lui și, din această cauză, atomul este complet neutru din punct de vedere electric. Vorbind despre neutralitatea electrică a unui atom sau a unei molecule, trebuie să se atragă atenția asupra unui amănunt important. Cînd electronii se rotesc absolut simetric în jurul nucleului, poziția lor mijlocie coincide cu poziția nucleului. La un atom de acest fel, valoarea medie a momentului lui electric este nulă. Reamintim că se numește moment electric produsul dintre una din sarcini (cele două sarcini sînt egale și de semn opus) și distanța dintre ele. Sînt însă frecvente cazurile cînd, datorită unor anumite cauze, în timpul deplasării electronilor în jurul nucleelor apare o perturbare a acestei simetrii. Ea se manifestă prin faptul că electronii trec în cea mai mare parte a timpului printr-o anumită regiune a moleculei. Lucrurile stau ca și cînd electronii ar fi deplasați lateral în raport cu nucleele. In asemenea împrejurări, molecula devine polară și posedă un moment electric oarecare.

Electronii de valență care alcătuiesc pătura cea mai exterioară a atomului, fiind cei mai îndepărtați de nucleu, sînt legați cel mai slab de acesta. Din această cauză, în anumite condiții, atomul poate pierde unul sau chiar mai mulți dintre electronii lui. Atunci, un asemenea atom încetează de a mai fi neutru și se transformă într-un ion încărcat pozitiv. Sarcina pozitivă a unui ion de acest fel este determinată de sarcina globală a tuturor electronilor pierduți de el. In anumite împrejurări, din atom pot pleca nu numai electronii de valență, dar și electroni de pe orbite mai interioare.

Care sînt cauzele fizice care creează posibilitatea apariţiei unor ioni în corpuri ? Există relativ multe asemenea cauze. Una dintre ele este mişcarea termică a atomilor. În corpurile solide, lichide şi gazoase, mişcarea termică se manifestă în mod diferit. În gaze, ea se exprimă printr-o deplasare extraordinar de rapidă a atomilor prin întreg volumul gazului. Atomii sau moleculele ce formează un gaz oarecare se vor deplasa cu cele mai diferite viteze şi în toate direcţiile posibile, suferind nenumărate ciocniri în drumul lor. Datorită acestei mişcări haotice, traectoria unui atom sau a unei molecule de gaz reprezintă o linie frîntă, la care punctele de frîngere corespund ciocnirii unei particule cu alta.

În corpurile solide, şi în continuare va fi vorba numai despre ele; mişcarea termică se manifestă prin faptul că particulele ce alcătuiesc corpul considerat, adică atomii şi moleculele, nu se deplasează ca într-un gaz, prin întreg volumul corpului, ci numai săvîrşesc oscilaţii în jurul anumitor poziţii centrale. Oricare ar fi însă caracterul mişcării termice, întotdeauna şi în toate cazurile ea este întovărăşită de nenumărate ciocniri ale particulelor între ele. În acest caz, se poate întîmpla ca în momentul unei ciocniri puternice, dintr-un atom să fie smulşi unul sau chiar mai mulţi electroni. Atunci, un asemenea atom va deveni un ion. Dar care este soarta acestor electroni smulşi ? Pentru o perioadă de timp foarte scurtă, care a căpătat denumirea de „timp de viaţă", aceşti electroni vor vagabonda liber prin întregul volum al corpului solid, iar după aceea vor fi atraşi şi captaţi din nou de unii ioni pozitivi sau chiar de atomi neutri. În ultimul caz, atomii care anterior erau neutri, dobîndind o sarcină negativă suplimentară, se vor transforma în ioni încărcaţi negativ.

În ceea ce priveşte structura materiei, fizica modernă a stabilit o serie întreagă de legi dintre cele mai importante, străine spiritului fizicii vechi, aşa-numita fizică clasică, prin introducerea noţiunii de cuantificare. Fireşte, aceste legi nou descoperite, care la prima privire par stranii şi cel puţin uimitoare, au constituit rezultatul unor cercetări teoretice şi experimentale profunde. Dar ce legi a stabilit teoria cuantică în ştiinţa despre structura atomului ? S-a descoperit că fiecare electron care face parte din structura unui atom poate dispune numai de o energie strict determinată. Spectrul energetic al electronilor nu este continuu, ci prezintă o structură discretă. Aceasta înseamnă că electronii care alcătuiesc un

atom nu pot avea orice energie, ci se pot afla numai în stările energetice „permise". De aceea, dacă studiem un atom concret oarecare, electronii acestui atom vor fi distribuiţi conform unor stări energetice riguros determinate, care mai poartă denumirea de „nivele energetice". În anumite condiţii, electronul poate trece de la un nivel de energie „permis" la altul, dar nu se poate afla în nici o stare intermediară, aceasta fiind „interzisă". Din punctul de vedere al mecanicii clasice, care s-a obişnuit cu continuitatea, o asemenea situaţie pare cît se poate de absurdă: existenţa unor niveluri permise şi interzise nu-şi găseşte nici un fel de justificări îndreptăţite în cadrul ştiinţei clasice. Dar, din punctul de vedere al concepţiilor cuantice actuale, asupra naturii lucrurilor, o asemenea situaţie nu este numai fundamentată teoretic, dar este şi demonstrată pe cale experimentală.

Experienţa şi teoria arată că într-un atom nu pot exista mai mult decît doi electroni care să se găsească în una şi aceeaşi stare. De aceea, chiar şi în cel mai complicat atom, toţi electronii sînt repartizaţi conform nivelurilor lor de energie. Deoarece electronii sînt legaţi de nucleul atomului prin forţele de atracţie coulombiene, trecerea electronului de la un nivel mai scăzut la un nivel mai înalt este legată de o cantitate de energie, care trebuie să fie cedată atomului. Trecerea inversă, de la un nivel energetic mai înalt la un nivel mai scăzut, este întovărăşită de pierderea de către atom a unei anumite cantităţi de energie.

Este cît se poate de evident că dacă electronii pot ocupa într-un atom numai anumite niveluri de energie, strict determinate, şi nu se pot găsi pe nivelurile intermediare, „interzise", atît pierderea de energie de către un electron, cît şi dobîndirea de energie de către acesta, nu se produc continuu, ci discret, în salturi. Acest principiu teoretic evident a fost confirmat de nenumărate lucrări experimentale.

În cazul trecerii electronului de la un nivel de energie mai înalt la unul mai scăzut se emite o cuantă de lumină. Invers, absorbţia unor cuante de lumină de către atomii materiei este însoţită de către trecerea electronilor de la niveluri de energie mai scăzute la niveluri mai înalte.

Dar ce sînt cuantele de lumină?

Printr-o serie întreagă de experienţe s-a stabilit că lumina nu este emisă şi absorbită într-un flux continuu, ci în porţiunii separate. Aceste porţiuni au căpătat în fizică denumirea de cuante de lumină sau fotoni. Prin urmare, fotonul este o

porţiune elementară de radiaţie. În consecinţă, fluxul luminos are o structură discontinuă şi este format dintr-un număr uriaş de fotoni. Pe de altă parte, fiecare radiaţie posedă şi proprietăţi ondulatorii, care se manifestă cu atît mai pregnant, cu cît frecvenţa este mai mică. Radiaţia posedă simultan atît proprietăţi ondulatorii cît şi cuantice, însă în unele cazuri (la frecvenţe mai mari) se observă uşor proprietăţile cuantice, iar în alte cazuri (frecvenţe mai mici) se observă uşor proprietăţile ondulatorii. Un electron care se găseşte pe un nivel notat convenţional cu cifra 2, posedă energia W_2. Cînd se găseşte pe nivelul mai scăzut 1, electronul are energia W_1. Aşa dar, în cazul trecerii unui electron de la nivelul 2 la nivelul 1, atomul radiază un foton cu energia Σ, avînd valoarea

$$\varepsilon = W_2 - W_1.$$

Teoria cuantică a luminii a stabilit că există o relaţie cît se poate de riguroasă, respectată întotdeauna, între frecvenţa oscilaţiilor luminoase şi valoarea energiei fotonului. Cu cît frecvenţa luminii emise este mai mare, cu atît fotonul posedă mai multă energie şi, invers, o dată cu micşorarea frecvenţei energia lui scade. Dacă se notează cu Σ energia fotonului, expresia $\varepsilon = h\nu$ va reflecta tocmai această dependenţă. Aici ν este frecvenţa luminii, iar h o constantă universală numită constanta lui Planck şi egală cu $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg s.

Teoria cuantică a luminii, creată de marele fizician Albert Einstein, a permis să se descopere taina structurii atomului, a dat posibilitatea să se înţeleagă multe fenomene inexplicabile de pe poziţiile fizicii clasice şi a constituit un stimulent puternic pentru cunoaşterea ulterioară a naturii.

2. METALELE

Toate metalele se caracterizează printr-o conductivitate mare, care ajunge pînă la sute de mii de mho. Astfel, de exemplu, conductivitatea argintului este $\sigma = 6 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \mathrm{cm}^{-1}$. Cauza acestei conductivităţi electrice apreciabile se ascunde în condiţiile specifice de legătură între electronii de valenţă ai atomului de metal şi nucleul acestui atom. Spre deosebire de multe alte substanţe, în atomii metalelor nu toţi electronii

sînt suficient de rigid legaţi de nucleele lor. Electronii care alcătuiesc păturile electronice exterioare sînt atraşi cel mai puţin de către nucleu. O asemenea situaţie are loc nu numai la atomii metalelor, dar şi în atomii altor substanţe. Atomii metalelor prezintă însă o particularitate care distinge net metalele de restul celorlalte corpuri solide. Această particularitate constă în faptul că în pătura electronică exterioară a atomului unui metal există cel puţin un electron care este atît de slab legat de nucleul respectiv, încît se poate elibera uşor de atracţia nucleului şi poate părăsi limitele atomului propriu vagabondînd liber prin întreaga masă a metalului. Aici este important să se sublinieze că eliberarea unui asemenea electron din atomul propriu se produce fără nici un fel de influenţă exterioară asupra lui. La formarea unui metal, prin urmare, atomii lui pierd o parte din electroni. În mod obişnuit, numărul acestor electroni — în ce priveşte ordinul de mărime — este egal cu numărul atomilor de metal din unitatea de volum, adică fiecare atom de metal pierde cîte un electron. Aceşti electroni, care se eliberează uşor, rătăcesc printre nuclee, cînd ocupînd locurile libere care s-au format în vecinătatea unor nuclee, cînd părăsindu-le din nou. Dacă presupunem că într-un corp metalic oarecare există 10 trilioane de atomi, în acelaşi corp se vor găsi cel puţin 10 trilioane de electroni care s-au smuls din atomii lor. Şi toate aceste trilioane de electroni, care s-au eliberat de forţele de interacţiune ce îi leagă de nuclee, rătăcesc liber prin întreaga bucată de metal, trecînd de la un atom la altul, de la un spaţiu interatomic la altul.

Dar căror nuclee le aparţin aceşti electroni vagabonzi? Strict vorbind, niciunora. Electronii vagabonzi aparţin în egală măsură întregii mase de atomi care formează metalul respectiv. Electronii de acest fel sînt numiţi „liberi" în fizica modernă, subliniindu-se prin aceasta faptul că nu sînt legaţi de atom şi posedă posibilitatea de a călători în orice direcţii din interiorul unei mase de metal oarecare.

Atomul de metal care a pierdut unul sau mai mulţi electroni va deveni un ion. De aceea, un electron liber, la întîlnirea cu un asemenea ion, poate intra din nou în structura lui, dînd naştere unui atom neutru. În consecinţă, în orice metal se desfăşoară un proces complicat, care nu se întrerupe nici măcar o secundă: formarea electronilor liberi şi recombinarea lor cu ionii. Datorită existenţei acestor procese inverse, concentraţia electronilor liberi dintr-un metal este con-

stantă. Caracterul constant al concentrației este condiționat de faptul că, în orice moment, în metal există un echilibru dinamic între electronii liberi nou formați și electronii care au intrat iarăși în sistemul unui ion oarecare.

Concentrația de electroni liberi ai unui metal tipic, adică numărul lor pe unitatea de volum, are o valoare riguros determinată, egală cu numărul de atomi din unitatea de volum, înmulțit cu valența metalului respectiv. Dacă drept unitate de volum s-a luat 1 cm^3, în el vor exista aproximativ 10^{23} atomi; deci, numărul de electroni liberi din 1 cm^3 va fi aproximativ egal cu n 10^{23}, unde n este valența metalului. Este cît se poate de util și excepțional de important faptul că concentrația electronilor liberi dintr-un metal își păstrează valoarea constantă și practic nu depinde de nici un fel de factori exteriori : temperatură, presiune, umiditate. Aceasta înseamnă că atît la zero absolut, cît și la temperatura de topire, în metal există una și aceeași cantitate de electroni liberi, împrejurare care joacă un rol important și diferențiază net metalele de toate celelalte corpuri solide.

Prin urmare, metalele sînt alcătuite din ioni. Fiecare ion ocupă o poziție fixă oarecare. Mișcarea termică se manifestă aici prin faptul că ionii săvîrșesc oscilații de amplitudine mică în jurul poziției de echilibru. Odată cu creșterea temperaturii, amplitudinea oscilațiilor se va mări, iar dacă temperatura scade — va deveni mai mică.

Dimensiunile ionilor, la drept vorbind, sînt determinate de dimensiunile păturilor lor electronice exterioare, și sînt de același ordin de mărime ca și distanțele dintre ele. Păturile electronice ale atomilor unui metal sînt atît de împletite între ele, încît numai electronii cei mai apropiați de un nucleu formează cu nucleul un fel de ansamblu și fac împreună cu el mișcările oscilatorii.

Electronii liberi, distribuiți uniform în întreaga masă a metalului, determină conductivitatea electrică de valoare mare a acestuia și formează un fel de „gaz electronic". Acest termen, adoptat în fizica modernă, provine din compararea comportării electronilor liberi dintr-un metal cu comportarea moleculelor de gaz.

Curentul electric ce apare într-un conductor metalic reprezintă un flux de electroni liberi, care se deplasează în sens invers cîmpului electric.

Ionii grei, încărcați pozitiv, ai metalului, oscilează în jurul pozițiilor lor de echilibru și nu participă la mișcarea

dirijată în sensul cîmpului. De aceea, cînd printr-un conductor metalic circulă un curent electric, acest proces nu este însoţit de un transport al materiei conductorului. După expresia plastică a unui fizician, „electronii de conducţie dintr-un metal pot fi comparaţi cu aerul care se găseşte în porii unei substanţe poroase oarecare (de exemplu, un burete) : dacă se face în aşa fel, încît într-o parte a buretelui presiunea aerului să fie mai mică decît în altă parte, aerul se va infiltra prin burete, iar diferitele particule de aer vor descrie traectorii foarte neregulate, ciocnindu-se şi amestecîndu-se unele cu altele şi urmărind totodată contururile porilor din interiorul buretelui. Fluxul de electroni care trece printr-un metal este în linii mari analog unui asemenea curent de aer care circulă printr-o substanţă poroasă, deoarece vitezele electronilor izolaţi pot fi îndreptate în orice direcţie şi numai în medie se obţine infiltrarea „gazului electronic" prin metal.

Analogia prezentată reflectă în mare măsură aspectul fizic al fenomenului de apariţie a curentului electric într-un metal. Electronii liberi se deplasează în interiorul metalului cu viteze colosale ca valoare, ce ajung la sute de milioane de centimetri pe secundă. Direcţia acestor viteze este cît se poate de diferită : electronii zboară vertiginos în toate părţile, suferind nenumărate ciocniri în drumul lor. Se înţelege că în cazul fiecărei ciocniri de acest fel dintre un electron şi un ion care oscilează în reţeaua cristalină, se schimbă fie valoarea, fie direcţia vitezei electronului care s-a ciocnit, fie ambele.

Dacă unui metal i se aplică un cîmp electric exterior, sub influenţa acestui cîmp electronii de conducţie vor începe să capete o viteză suplimentară, dirijată în sens invers cîmpului electric şi toţi aceştia vor începe să se deplaseze în metal, ca un întreg, de la potenţialul mai scăzut spre potenţialul mai înalt. Dacă electronii de conducţie, în timpul deplasării lor, sub influenţa cîmpului electric, nu ar suferi nici un fel de rezistenţă, viteza lor ar creşte mereu în cazul unei valori constante a intensităţii cîmpului electric aplicat. Dar aceasta nu se întîmplă. Viteza medie a electronilor de conducţie, pentru o valoare dată a intensităţii cîmpului, atinge — în fiecare metal — o valoare finită oarecare. Creşterea ulterioară a vitezei are loc numai odată cu mărirea intensităţii cîmpului electric aplicat metalului. În conformitate cu legea lui Ohm, această creştere a vitezei va fi direct proporţională cu creşterea intensităţii cîmpului, ceea ce — exprimat în imagini mai obişnuite — nu înseamnă altceva decît că

intensitatea curentului este direct proporţională cu diferenţa de potenţial aplicată.

Este uşor să se calculeze intensitatea $I = Q/t$ a acestui curent, adică o mărime care constituie măsura cantităţii de electricitate Q care trece, în unitatea de timp, prin secţiunea transversală a conductorului. Să admitem că aria secţiunii transversale a conductorului este egală cu S cm² şi că în fiecare centimetru cub din conductor se găsesc n electroni de conducţie. Să presupunem după aceea, că mobilitatea electronilor liberi, adică viteza lor medie de deplasare sub influenţa unui cîmp electric avînd intensitatea de 1 V/cm, are valoarea u cm²/sV. In acest caz, intensitatea I a curentului va fi egală cu

$$I = neu\,SE,$$

unde E este intensitatea cîmpului electric, iar e — sarcina electronului, egală cu

$$e = 4{,}803 \cdot 10^{-10}\ \text{CGSE} = 1{,}601 \cdot 10^{-19}\ \text{Cb}$$

Expresia (1) reprezintă tocmai legea lui Ohm scrisă într-o formă oarecum neobişnuită. Pe de altă parte, se ştie că legea lui Ohm este exprimată deobicei astfel:

$$I = \frac{V_2 - V_1}{R},$$

unde $V_2 - V_1$ este diferenţa de potenţial dintre capetele conductorului, iar R — rezistenţa acestuia. Egalînd părţile drepte ale expresiilor (1) şi (2), vom obţine:

$$neuSE = \frac{V_2 - V_1}{R}$$

Dar $V_2 - V_1 = EL$, unde L este lungimea conductorului. Atunci

$$neuSE = \frac{EL}{R},$$

de unde rezultă

$$R = \frac{1}{neu} \cdot \frac{L}{S}.$$

Examinînd această formulă se observă că $\frac{1}{neu} = \rho$ este rezistivitatea conductorului, iar $neu = \sigma$ — conductivitatea acestuia.

Viteza medie de deplasare dirijată a electronilor de conducție, pentru o valoare strict determinată a intensității cîmpului electric, reprezintă pentru metalul considerat — la aceeași temperatură a lui — o mărime constantă oarecare. Asupra tuturor electronilor unui metal care se află într-un cîmp electric acționează însă forțe electrice care îi obligă să se deplaseze accelerat. Dar de ce, cu toate aceste condiții, electronii de conducție se deplasează totuși cu viteza constantă? Acest fenomen se explică ușor dacă se ține seama că electronii care se deplasează printr-un metal întîmpină în drumul lor rezistența condiționată de numărul colosal de ciocniri dintre electroni și ionii în stare de vibrație ai metalului. Această împrejurare face ca viteza de deplasare dirijată a electronilor de conducție, pentru valoarea respectivă a intensității cîmpului să capete o valoare constantă oarecare. Calculele arată că viteza medie a electronilor care se deplasează într-un metal sub influența diferenței de potențial aplicate, este foarte mică în comparație cu vitezele determinate de mișcarea termică. În ce privește mobilitatea, aceasta se măsoară prin cîteva zeci de centimetri pe secundă. Practic, aceasta înseamnă că în cazul unui cîmp cu intensitatea de 1 v/cm, în conductor electronii de conducție se vor deplasa în medie, în timp de o secundă, cu numai cîteva zeci de centimetri. În legătură cu aceasta apare o altă întrebare: de ce atunci cînd închidem, cu ajutorul unui întrerupător, un circuit electric, curentul apare practic instantaneu și la cel mai îndepărtat capăt al liniei? În adevăr, dacă legăm Leningradul de Moscova printr-o linie electrică, iar apoi „trimitem" curent pentru Moscova, se va observa că apariția curentului la Moscova se produce aproximativ la două miimi de secundă după închiderea întrerupătorului în Leningrad. De aici s-ar putea trage concluzia că viteza dirijată de mișcare a electronilor este excesiv de mare. Știind că distanța dintre Moscova și Leningrad este aproximativ egală cu 600 km se poate calcula această viteză. Ea se dovedește a fi egală cu 300 000 km/s. O asemenea concluzie, dacă am ajunge la ea, ar fi însă pripită. Intervalul de timp dintre închiderea întrerupătorului și apariția curentului este într-adevăr foarte mic, dar aceasta se explică nu prin viteza uriașă de deplasare a electronilor de conducție, căpătată de aceștia din urmă datorită existenței diferenței de potențial, ci de viteza colosală de propagare prin conductoare a cîmpului electric, care — la drept vorbind — „gonește" electronii de la Leningrad spre Moscova.

La două miimi de secundă după închiderea întrerupătorului la Leningrad, cîmpul electric produs de centrala electrică din Leningrad se va propaga pînă la Moscova. Pe întreaga lungime a conductoarelor, în decursul acestui interval de timp, el va pune în mişcare toţi electronii liberi de pe întreaga linie, inclusiv aceia din partea de linie care este aşezată chiar la Moscova.

Prin urmare, apariţia excepţional de rapidă a curentului electric pe întreaga linie este condiţionată numai de viteza foarte mare de propagare a cîmpului electric.

Din toate cele arătate referitor la conductivitatea electrică a unui metal, rezultă că electronii liberi condiţionează proprietăţile electrice ale acestuia. Trebuie să mai adăugăm că de comportarea acestor electroni depind şi proprietăţile magnetice, optice, termice şi chimice ale metalului.

Din examinarea naturii fenomenului de conducţie electrică într-un metal, rezultă inevitabil încă o consecinţă: variaţia în funcţie de temperatură a rezistivităţii. În adevăr, după cum arată experienţa, rezistivitatea unui metal se măreşte o dată cu creşterea temperaturii şi, invers, se micşorează atunci cînd temperatura scade. Rezistivitatea este însă determinată de trei mărimi: mobilitatea electronilor, concentraţia lor şi sarcina electronului:

$$\rho = \frac{1}{neu},$$

Pentru un anumit metal, concentraţia n şi sarcina e a electronului sînt mărimi constante, care nu depind de temperatura metalului. Pe de altă parte, este evident că mobilitatea u a electronilor trebuie — fără îndoială — să depindă şi ea de temperatură. În adevăr, o dată cu creşterea temperaturii, mişcarea termică se intensifică, ceea ce perturbează regularitatea structurii interne a metalului, ducînd la ciocniri mai frecvente între electroni şi ionii metalului. Acest fapt, la rîndul lui, îngreuiază infiltrarea electronilor prin metal, şi ca urmare, pentru aceeaşi intensitate de 1 V/cm a cîmpului electric, viteza de deplasare a purtătorilor de curent, adică mobilitatea lor, va fi mai mică; în consecinţă, rezistivitatea ρ se măreşte. Odată cu scăderea temperaturii metalului, mişcarea termică devine mai puţin intensă, structura metalului se ordonează şi numărul de ciocniri între electronii liberi şi ionii metalului se micşorează ceea ce uşurează trecerea electronilor prin metal. Toate acestea duc la creşterea mobilităţii. În apro-

piere de temperatura de zero absolut, electronii nu întîmpină practic nici o rezistență ; din această cauză, conductibilitatea electrică a unui metal, la fel ca și mobilitatea electronilor, are o valoare mare. La unele metale, în cazul unor temperaturi scăzute apare o stare calitativ nouă — super-conductibilitatea, interesantă prin faptul că rezistivitatea se anulează.

La majoritatea metalelor pure, într-un interval de temperatură mic, rezistivitatea ρ depinde liniar de temperatură, conform legii :

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha t),$$

unde α este un coeficient de temperatură egal numeric cu 0,00367 ;

ρ_0 — rezistivitatea la 0^0C.

Vorbind despre electronii liberi dintr-un metal, este interesant să amintim despre experiențele istorice prin care s-a stabilit valabilitatea concepțiilor expuse, referitoare la mecanismul conductibilității electrice a metalelor. Experiențe de acest fel au fost efectuate în număr mare la timpul lor. Vom vorbi despre două dintre ele. In 1901, Rieke a confecționat trei cilindri : unul de cupru, unul de aluminiu și iarăși unul de cupru. Bazele acestor trei cilindri, el le-a făcut riguros plan paralele și le-a șlefuit cu grijă. După aceea i-a pus unul peste altul și i-a fixat rigid (fig. 1). In această situație, prin cilindri a circulat neîncetat un curent continuu, timp de un an întreg. In această perioadă, prin cilindri au trecut 3.448.800 coulombi de electricitate. Dacă trecerea curentului prin metal ar fi fost însoțită de transportul materiei, atomii de metal care formează un cilindru, ar fi pătruns în alt cilindru. Nu s-a putut însă observa nimic de felul acesta. Cilindrii nu s-au modificat cîtuși de puțin și și-au păstrat greutatea cu o eroare de ± 0,03 mg.

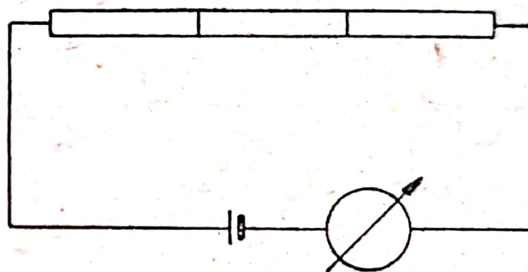


Fig. 1. Schema experienței lui Rieke

Experiența lui Rieke a dovedit elocvent faptul că ionii metalului nu iau deloc parte la formarea curentului.

O altă experiență, efectuată în 1916 de către fizicienii americani Stuart și Tolman, a demonstrat evident că conductibilitatea electrică a metalelor este condiționată numai de electroni. Schema acestei experiențe este următoarea : o bobină

cu număr mare de spire, confecționată din sîrmă izolată, este rotită foarte repede, iar după aceea este frînată brusc. Cu ajutorul unui dispozitiv special, capetele bobinei se conectează la un așa-numit galvanometru balistic, un aparat care arată ce cantitate de electricitate trece prin el. Dacă în metal există într-adevăr electroni liberi, după oprirea bruscă a bobinei ei trebuie să continuie să se mai deplaseze un timp oarecare, datorită inerției, ceea ce va provoca deviația corespunzătoare a galvanometrului. Dacă însă nu există electroni liberi, în cazul acestei experiențe — după oprirea bobinei — acul galvanometrului nu trebuie să devieze din poziția lui de zero.

S-a descoperit că oprirea bruscă a unei bobine în stare de rotație, atrage după sine apariția unui curent de foarte scurtă durată. Galvanometrul balistic arată cantitatea de electricitate care circulă prin el. In funcție de sensul curentului electric, se poate afla ce fel de sarcini se deplasează prin conductorul bobinei, — pozitive sau negative. Această analiză cît se poate de simplă arată că prin bobină se deplasează purtători de electricitate negativă. Condițiile experienței și măsurarea mărimilor corespunzătoare, permit să se calculeze, pentru sarcinile electrice care se deplasează prin sîrmă datorită inerției, raportul dintre sarcina e și masa m a acestora. Rezultatele calcului coincid precis cu valoarea calculată a raportului e/m al electronilor. Repetînd această experiență de mai multe ori, și cu bobine înfășurate din sîrme metalice diferite — de cupru, de fier, de argint și altele — se obține invariabil, cu erorile inevitabile oricăror experiențe, unul și același rezultat. Acest fapt confirmă natura unică a electronilor care fac parte din alcătuirea atomilor oricăror metale. Experiența, în întregul ei, dovedește că într-un metal există într-adevăr un număr oarecare de electroni liberi, nelegați de atomi, care — în anumite condiții — formează un curent electric.

3. CRISTALELE

Din nespus de bogata varietate de corpuri solide din natură, majoritatea au o structură cristalină. Deosebindu-se printr-o serie de proprietăți specifice, cristalele ies puternic în evidență dintre toate celelalte corpuri și au atras atenția oamenilor de știință încă din cele mai vechi timpuri. Timp

îndelungat s-au făcut încercări de a le descoperi structura, dar toate aceste încercări s-au sfîrșit invariabil cu insuccese. Încă la sfîrșitul secolului al XVIII-lea, cristalograful Hein a emis ipoteza că toate cristalele sînt alcătuite din atomi așezați regulat. Această ipoteză nu era însă cu nimic mai mult decît o presupunere îndrăzneață, nesusținută de nici un fapt justificat pe cale experimentală.

Într-o carte a sa, tipărită la sfîrșitul secolului al XIX-lea cunoscutul savant englez Perry scria: „Nu este necesar să vă enumăr și alte exemple din lista lungă a acelor proprietăți remarcabile ale corpurilor solide, pe care încă nu le înțelegem. Tehnicienii știu foarte multe despre ele și se bazează pe proprietățile lor, însă, după cît se pare, nici unul dintre ei nu are nici cea mai mică idee despre cauzele care provoacă aceste proprietăți. Nu este vorba de faptul că tehnicianul încălzește oțelul și descoperă schimbările uimitoare ale proprietăților acestuia în cazul unei modificări neînsemnate a compoziției lui chimice, ci de faptul că omul de știință și tehnicianul sînt la fel de documentați în privința acestor fapte, și tot la fel, nu au idee despre adevărata lor natură".

Această situație a existat pînă în 1885, cînd — în fine — în înțelegerea naturii cristalelor a avut loc primul salt uriaș. În acest an, cunoscutul cristalograf E. S. Fedorov din Petersburg, pe baza unei analize teoretice profunde, a stabilit legile fundamentale ale structurii corpurilor cristaline și a arătat că în lumea cristalelor pot exista 230 tipuri diferite de simetrie. După 10 ani, în 1895, știința a înregistrat încă o mare victorie. In acest an, Wilhelm Konrad Roentgen a descoperit razele care au căpătat ulterior numele lui. Această descoperire remarcabilă a pus în mîinile oamenilor de știință un instrument puternic de cercetare a naturii, care a permis să se pătrundă adînc în structura materiei și să se elucideze în mod definitiv problema structurii cristalelor. Acest ultim fapt a devenit posibil în condiții reale în 1912, cînd — după ideea lui Laue — doi fizicieni tineri, Friedrich și Knipping au pus la cale o experiență care explica natura razelor Roentgen. Pe de altă parte, aceeași experiență arată că se poate studia structura corpurilor cristaline cu ajutorul razelor Roentgen. Prin lucrările lui W. H. Bragg și W. L. Bragg (tată și fiu) în Anglia și ale lui G. V. Vulf din Moscova, s-a descoperit că razele Roentgen permit să se determine foarte precis și foarte amănunțit structura unui cristal. Din acest moment, o ramură independentă și vastă a

științei — cristalografia — a făcut din tubul Roentgen un instrument de studiu principal și necesar.

Ce particularități diferențiază însă cristalul de un corp amorf? Dacă se vorbește numai despre criteriile pur exterioare, cristalele — spre deosebire de corpurile amorfe — se caracterizează prin forma lor, limitată de regulă de fațete plane naturale, care se intersectează una cu alta sub anumite unghiuri; datorită acestui fapt, orice cristal are forma unui poliedru, cel mai simplu dintre acestea fiind cubul.

Proprietățile fizice ale corpurilor amorfe nu depind de direcție. Dacă dintr-o masă de sticlă turnată, care constituie un corp tipic amorf, se taie un poliedru oarecare, de exemplu un paralelipiped, iar după aceea se măsoară conductivitatea, constanta dielectrică, coeficientul de conductibilitate termică, indicele de refracție sau oricare altă mărime fizică, de-a lungul unei axe a paralelipipedului, apoi de-a lungul altei axe, după aceea de-a lungul unei a treia axe etc., ne vom convinge de faptul că valorile numerice obținute vor fi absolut identice. Această particularitate a unor corpuri se numește izotropie, iar corpurile ale căror proprietăți nu depind de direcție se numesc izotrope.

Cu totul altă situație se observă la cristale. Spre deosebire de corpurile amorfe, cristalele sînt anizotrope. Aceasta înseamnă că unele proprietăți fizice ale cristalelor depind de direcție. Natural, pentru diferitele cristale, gradul de anizotropie este și el diferit. Anizotropia de cea mai mică proporție o posedă cristalul cubic. La majoritatea cristalelor, anizotropia se manifestă în modul cel mai evident în ce privește proprietățile lor mecanice.

Contrar corpurilor amorfe, cristalele se topesc la o temperatură anumită, trecînd în stare lichidă; la aceeași temperatură are loc și solidificarea lor.

Acestea sînt cîteva dintre deosebirile pur exterioare dintre cristale și corpurile amorfe.

Toate acestea, precum și alte proprietăți ale cristalelor, se explică printr-o particularitate a structurii lor. Cristalele posedă o structură internă ordonată. Particulele — atomi, ioni sau molecule — din care este alcătuit cristalul, formează o rețea spațială regulată, uniformă și periodică. O asemenea rețea se obține la intersecția a trei sisteme de plane, fiecare sistem fiind caracterizat prin faptul că toate planele lui componente sînt paralele unul cu altul și se află la egală distanță unul față de altul.

Particulele care formează cristalul sînt așezate în nodurile rețelei spațiale. Mișcarea termică a acestor particule se manifestă numai prin faptul că particulele-molecule, ioni sau atomi — săvîrșesc o mișcare vibratorie în jurul nodurilor, care — prin urmare — constituie centre de mișcare vibratorie termică. Dacă se face abstracție de mișcarea termică, adică nu se ține seama de ea, se poate considera că particulele cristalului sînt fixate în nodurile rețelei spațiale.

Între aceste particule există forțe de interacțiune, care depind de distanța dintre ele. La distanțe relativ mari, particulele se atrag una pe alta. Dacă ele se apropie mult, forțele de atracție se transformă în forțe de respingere. În orice cristal, particulele care îl formează se găsesc una de alta la o astfel de distanță, încît forțele de respingere sînt echilibrate de forțele de atracție și astfel întregul cristal reprezintă o formație rigidă. Caracterul ordonat și periodicitatea structurii cristalului, precum și caracterul determinat al legăturii dintre particule, asigură o „construcție" rațională a rețelei spațiale a cristalului. Dacă toate celelalte condiții sînt aceleași, cristalul se prezintă ca un corp solid ale cărui particule componente sînt „împachetate" în modul cel mai compact și mai rațional. Se înțelege că densitatea de „împachetare" este diferită pentru diversele cristale.

În funcție de natura particulelor din care este construit un cristal, se disting rețele cristaline moleculare, atomice, ionice și, respectiv, metalice.

Rețelele atomice sînt create în cazul cînd atomii care formează cristalul sînt legați între ei prin intermediul așa-numitelor perechi de electroni. Prin pereche de electroni trebuie să se înțeleagă doi electroni ce gravitează în jurul a două nuclee și care posedă energie identică și momente magnetice de sens opus. Fiecare electron poate fi considerat ca un magnet minuscul, care posedă o axă magnetică. În cazul de față, cînd perechea de electroni se va roti în jurul nucleelor, axele magnetice ale electronilor se vor așeza paralel una față de alta, iar polii lor de același nume vor fi atunci dirijați în sensuri opuse. Pentru simplitate, vom studia molecula de hidrogen H_2. Fiecare atom de hidrogen constă dintr-un nucleu și un electron care se rotește în jurul acestuia din urmă. Cînd doi atomi de hidrogen se reunesc într-o moleculă, cei doi electroni vor începe să se rotească simetric în jurul ambelor nuclee. Într-un asemenea sistem, electronii —

fiind atraşi de nuclee — parcă îi cimentează pe aceştia, nelăsîndu-i să se despartă (fig. 2).

La alte molecule, o legătură de acest fel poate fi realizată de către două, trei, sau chiar patru perechi de electroni.

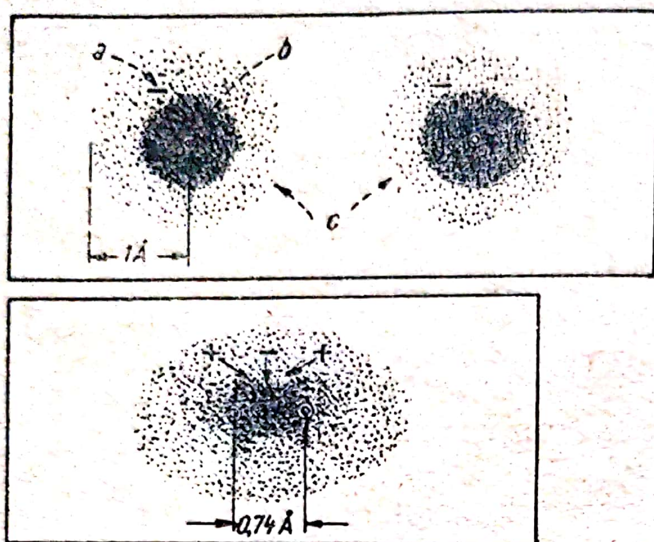


Fig. 2. Legătura electronică în molecula de hidrogen. Desenul de sus reprezintă schematic doi atomi de hidrogen izolaţi. În desenul de jos este arătată o moleculă de hidrogen. *a* — electron, *b* — nucleu; *c* — puncte care reprezintă densitatea sarcinilor electronilor.

Reţelele ionice sînt formate din ioni opuşi ca semn, fixaţi în nodurile lor. Un exemplu de cristale ionice pot fi: sarea de bucătărie (NaCl), clorura de cesiu (CsCl) şi alţi compuşi. În nodurile reţelei ionice se amplasează alternat ionii pozitivi ai metalului şi ionii negativi ai metaloidului. În acest caz, legătura dintre ioni se realizează prin forţele electrostatice descrise de legea lui Coulomb.

În fig. 3 este reprezentată schema reţelei clorurii de sodiu (NaCl). Aici, cu cerculeţe negre sînt notaţi ionii de sodiu (Na^{+}), iar cu cerculeţe albe — ionii de clor (Cl^{-}). Examinînd fig. 3, vedem că fiecare ion de sodiu este înconjurat de 6 ioni de clor, iar fiecare ion de clor de 6 ioni de sodiu.

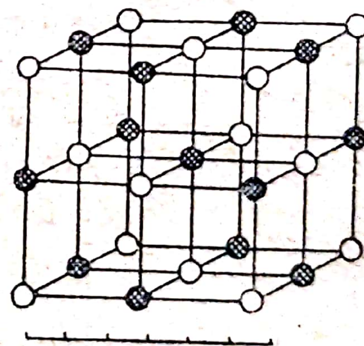


Fig. 3. Reţeaua cristalină a sării de bucătărie

De valoarea forţelor de interacţiune care leagă ionii unii de alţii, depind unele proprietăţi ale cristalului, cum sînt duritatea, solubilitatea şi temperatura de topire. Cu cît forţele de interacţiune din ioni sînt mai puternice, cu atît temperatura de topire este mai înaltă şi duritatea metalului este mai mare. În adevăr, natura fizică a procesului de topire constă în faptul că se rupe legătura dintre particulele ce formează cristalul. Fireşte, cu cît această legătură este mai puternică, cu atît este necesară o energie mai mare pentru

învingerea ei şi, în consecinţă, cu atît este mai mare temperatura pînă la care urmează a fi încălzit cristalul. Din acest punct de vedere se înţelege de ce un cristal se poate dizolva într-un lichid; dizolvarea se reduce şi ea la ruperea legăturilor dintre ioni. În consecinţă, cu cît forţele de interacţiune dintre ionii reţelei sînt mai puternice, cu atît cristalul este mai puţin capabil de a se dizolva.

În nodurile reţelei spaţiale a metalului se găsesc numai ionii pozitivi ai acestuia. Între ionii pozitivi există forţe de respingere mutuală, şi nu de atracţie; de aceea, s-ar părea că o asemenea reţea ar trebui să se distrugă, ceea ce — totuşi — nu se observă. Acest fapt, de neînţeles la prima vedere, se explică prin aceea că în metal există electroni liberi. Interacţionînd cu ionii pozitivi, electronii liberi asigură stabilitatea reţelei metalului, nu o lasă să se distrugă şi nici ei nu pot ieşi dintre graniţele ei.

În nodurile unei reţele moleculare, moleculele sînt legate una de alta prin forţe relativ slabe, al căror mecanism de acţiune se reduce de asemenea la o interacţiune electrică.

Această interacţiune poate apărea în două cazuri. Primul are loc atunci cînd molecula este asimetrică în sens electric. Aceasta înseamnă că, indiferent dacă molecula în întregul ei este neutră, centrele de greutate ale sarcinilor pozitive şi negative ale moleculei sînt deplasate unul faţă de altul. În cazul unei orientări corespunzătoare una faţă de alta, moleculele de acest fel vor începe să se atragă reciproc.

În al doilea caz, forţa de atracţie dintre molecule poate apărea chiar atunci cînd moleculele, nefiind polare prin natura lor, devin polare atunci cînd se apropie suficient de mult. Ca şi în primul caz, polaritatea apare datorită faptului că centrele de greutate ale sarcinilor negative şi pozitive ale moleculei se deplasează unul în raport cu altul. Reţele cristaline moleculare au cristalele de ghiaţă şi numeroase substanţe organice.

Acestea sînt, în linii mari, concepţiile fundamentale referitoare la legăturile din reţelele cristaline şi la structura lor. Tipurile de legături considerate reprezintă cazuri limită. În cristalele reale există şi toate tipurile de legături intermediare.

4. ELECTRONII DE CONDUCȚIE

Semiconductoarele, pe care le studiază fizica modernă și cu care are de-a face tehnica, sînt substanțe cu structură cristalină. De aceea, toate legile mișcării sarcinilor electrice în substanțele semiconductoare sînt legate de particularitățile acestei structuri. Orice cristal este constituit din atomi, ioni sau molecule. Oricare dintre aceste particule reprezintă un sistem electric, format din nuclee și electroni. În consecință, în interiorul cristalului trebuie să existe cîmpuri electrice. Cînd atomii se află unul față de altul la distanțe mari, cum se întîmplă de exemplu în gazele rarefiate, interacțiunea lor electrică nu joacă un rol esențial. Într-un cristal, însă, atomii, moleculele sau ionii sînt așezați ordonat și se găsesc, unul față de altul, la distanțe suficient de mici. De aceea, cîmpurile electrice ale atomilor vecini se influențează reciproc. Aceasta duce la faptul că cîmpurile diferitelor particule ce formează un cristal oarecare se compun, iar deoarece particulele din cristal reprezintă un sistem ordonat și periodic, în interiorul rețelei cristaline se creează un cîmp electric periodic. In cazul unui cristal ideal, fără impurități, și cu rețea ideal regulată, în el trebuie să existe un cîmp electrostatic riguros periodic. In realitate, însă, nu există cristale ideale în natură și, din această cauză, periodicitatea cîmpului este deobicei perturbată în puncte izolate.

Intr-o rețea cristalină au loc procese fizice complicate, care constituie cauza apariției unei serii întregi de fenomene. Totuși, înainte de a proceda la un studiu mai amănunțit al acestor procese, să descifrăm la început natura fizică a apariției conductibilității electrice în semiconductoare.

La fel ca și atomul unui metal, un atom de semiconductor este format dintr-un nucleu încărcat pozitiv și un număr oarecare de electroni care se rotesc în jurul lui. Așa dar, atomii de metale și de semiconductoare și, în general vorbind, atomii tuturor substanțelor, fără excepție, au aceeași alcătuire de principiu. Aici nu există nici un fel de deosebiri. În atomii semiconductoarelor, însă, toți electronii — chiar și cei mai îndepărtați de nuclee — sînt destul de bine legați de nucleele lor.

Acest fapt important arată de ce, în cazul unor temperaturi foarte joase, în semiconductoare nu există nici un fel de electroni liberi. Dar poate oare exista conductibilitate electrică în asemenea condiții? Firește, acest lucru este imposibil.

Pentru ca printr-o substanţă să circule un curent electric, este necesar ca în această substanţă să existe o mişcare dirijată a sarcinilor electrice, în cazul nostru — a electronilor. Dacă însă nu există asemenea sarcini, rezultă că nu poate exista nici curent. În consecinţă, orice semiconductor adevărat — la temperaturi foarte joase — este un material izolant care posedă o rezistenţă excesiv de mare.

S-ar părea că o substanţă la care toţi electronii sînt legaţi şi nu există nici un electron liber, ar trebui să constituie un material izolant la orice temperatură. Totuşi, în natură nu există asemenea substanţe. Orice substanţă, chiar şi cea mai bună dintre substanţele izolante pe care le cunoaştem, conduce în mod obligatoriu electricitate, într-o măsură mai mare sau mai mică, dar oricum conduce. Despre ce este oare vorba? De ce, la prima vedere, o concluzie absolut justificată, bazată pe ipoteze teoretice corecte, este în contradicţie cu practica ? Cauza constă în faptul că, emiţînd ipoteza noastră, n-am ţinut seama de mişcarea termică ce există pentru toate temperaturile ce pot fi atinse în practică.

După cum se ştie, în procesul de mişcare termică, particulele care formează corpul (atomi şi molecule) se ciocnesc în mod obligatoriu unele cu altele. În momentul unei ciocniri laterale puternice, dintr-un atom sau moleculă poate fi smuls un electron. În corp există însă nemaipomenit de multe particule, prin urmare şi numărul de electroni eliberaţi în felul acesta va fi de asemenea relativ mare. Prin ce se deosebesc aceşti electroni eliberaţi de electronii liberi ai metalului ? La drept vorbind, prin nimic. La fel ca şi electronii liberi ai metalelor, electronii liberi din semiconductoare au deplina posibilitate de a se deplasa în întreg volumul acestuia. Dar care este soarta lor ulterioară ? Ea nu se deosebeşte practic prin nimic de soarta electronilor liberi ai metalului. Şi anume : pentru un timp oarecare, foarte scurt, ei vor rătăci absolut liber între limitele corpului, apoi vor fi atraşi din nou de unii ioni pozitivi. În locul lor, vor apărea alţi electroni, smulşi din atomii semiconductorului, care vor fi complet liberi, etc. Nu este greu să se înţeleagă că aceşti electroni care s-au eliberat, numiţi „electroni de conducţie“ sînt analogi — în ce priveşte comportarea lor — cu electronii liberi ai metalului. Dacă într-un semiconductor se creează o diferenţă de potenţial, sub influenţa ei electronii de conducţie vor începe să se deplaseze de la potenţialul mai scăzut spre cel mai înalt, adică prin semiconductor va începe să circule un curent.

Prin urmare, în semiconductor se desfăşoară simultan două procese: apariţia electronilor de conducţie şi dispariţia lor. Datorită acestor procese se realizează aşa-numitul echilibru termic între numărul de electroni de conducţie care apar, şi numărul de electroni care sînt atraşi de ioni. Ca rezultat al acestui echilibru, într-un semiconductor vor exista întotdeauna un număr oarecare de electroni de conducţie. Ce rol joacă temperatura în aceste procese? Odată cu creşterea temperaturii, se măreşte numărul de ciocniri dintre atomi şi, în consecinţă, creşte şi numărul de electroni eliberaţi — adică de electroni de conducţie. De aceea, o dată cu creşterea temperaturii, concentraţia electronilor de conducţie dintr-un semiconductor se măreşte şi invers, o dată cu scăderea temperaturii, ea se micşorează, anulîndu-se la o temperatură foarte joasă.

Din explicarea mecanismului apariţiei conductibilităţii electrice a semiconductorului rezultă o consecinţă fizică esenţială, şi anume că rezistenţa acestuia depinde mai ales de numărul de electroni de conducţie. Cu cît numărul acestora este mai mare, cu atît rezistenţa este mai mică. Aşa dar, spre deosebire de metale, rezistenţa semiconductoarelor se micşorează odată cu creşterea temperaturii, iar în cazul unei scăderi a temperaturii — se măreşte.

Este natural să ne punem acuma următoarea întrebare: este oare mişcarea termică unicul factor care asigură apariţia electronilor de conducţie într-un semiconductor? Se pare că există şi alte posibilităţi. Deoarece conductibilitatea electrică a semiconductorului apare datorită faptului că unii electroni, care înainte erau legaţi, se eliberează, este suficient să se comunice electronilor energia necesară pentru desprinderea lor, pentru ca să apară conducţia. În afară de mişcarea termică, această energie poate fi transmisă electronilor semiconductorului de către o radiaţie electromagnetică, de particule elementare cu energie suficient de mare, de un cîmp electric intens, etc. Încă în secolul trecut se descoperise că rezistenţa a numeroase semiconductoare se modifică considerabil în funcţie de iluminarea lor. Acest fenomen, care a căpătat denumirea de efect fotoelectric interior, sau efect fotoconductiv, îşi găseşte o explicaţie simplă şi intuitivă. În adevăr, la o temperatură oarecare, într-un semiconductor aflat în obscuritate există un anumit număr de electroni de conducţie n_1. Aceşti electroni condiţionează conductibilitatea electrică obişnuită a substanţei, numită altfel şi conductibilitate de obscuritate. După ce

semiconductorul a fost supus unei iluminări, în el apar un număr suplimentar n_2 de electroni „de lumină", cu alte cuvinte care au fost eliberaţi cu ajutorul luminii, iar numărul total de electroni de conducţie nu va mai fi acum n_1, ci $n_1 + n_2$. În legătură cu aceasta, şi conductibilitatea electrică specifică a semiconductorului se va mări.

Un fenomen absolut analog se observă şi în cazul cînd un semiconductor este iradiat cu particule: electroni, protoni, particule α ş. a. Particula care bombardează semiconductorul cedează energia ei unui electron. Dacă această energie este de o asemenea valoare, încît poate duce la ionizarea atomului, adică la smulgerea unui electron, acest electron va deveni liber şi va putea participa la trecerea curentului electric prin semiconductor. Dacă energia particulei este mică, smulgerea electronului din atom nu va avea loc şi conductibilitatea electrică a semiconductorului nu se va mări.

5. ELECTRONI ŞI GOLURI

În paragraful precedent s-a arătat că în reţeaua cristalină a semiconductorului se desfăşoară procese fizice complexe cărora — printre altele — li se datoreşte şi apariţia conductibilităţii electrice a unui conductor. Mecanismul acestor procese poate fi înţeles din punctul de vedere al stărilor energetice posibile ale electronilor.

Toţi electronii unui atom izolat posedă numai energii strict determinate. Experienţe foarte sigure au arătat că în fiecare atom nu pot exista mai mult decît doi electroni care să se afle în una şi aceeaşi stare. Cînd N atomi de acest fel, apropiindu-se la distanţe mici, formează un corp cristalin solid, în interiorul reţelei cristaline apare un cîmp electric periodic. Cîmpurile electrice ale diferiţilor atomi ai cristalului au influenţă asupra valorii energiei electronilor, modificînd-o întrucît-va. Şi dacă în atomii izolaţi, electronii se găseau în stări energetice determinate, într-un cristal aceste stări se schimbă într-o oarecare măsură. Deoarece în cristal există N atomi, din cauza influenţei mutuale a cîmpurilor electrice ale acestor atomi, fiecare nivel de energie al atomului „se descompune" în N niveluri apropiate ca valoare, dar totuşi diferite, pe fiecare dintre ele putîndu-se afla cîte doi electroni. Aceste N niveluri formează o fîşie sau o zonă de energie. Zonele sînt despărţite una de alta prin domenii de energie

în care electronii nu se pot afla. Aceste domenii sînt numite „zone interzise". La temperatura de zero absolut, toţi electronii unui semiconductor ocupă cele mai scăzute niveluri de energie. La această temperatură, zonele de niveluri permise completate cu electroni, vor alterna cu zonele interzise.

Electronii cei mai apropiaţi de nucleu sînt legaţi atît de puternic de nucleele lor, încît nu pot participa la conducţia electrică. Aceasta este condiţionată numai de electronii de valenţă, adică de electronii cei mai exteriori.

Electronii de valenţă, la fel ca şi electronii aşezaţi mai aproape de nucleu, la o temperatură apropiată de zero absolut, ocupă nivelurile permise cele mai scăzute. În afară de nivelurile ocupate, într-un cristal de semiconductor există şi aşa-numitele niveluri de excitaţie, adică niveluri cu valori mai mari ale energiei. Aceste niveluri la o temperatură apropiată de zero absolut sînt libere. Electronii pot trece de la nivelurile ocupate iniţial la nivelurile de excitaţie numai în cazul cînd pentru acest scop li se va comunica energia suplimentară necesară.

Să examinăm structura zonelor energetice ale unui corp solid. Caracterul acestei structuri va depinde în mare măsură de materialul cu care avem de-a face: metal sau semiconductor. În primul caz, *în imediata vecinătate* a zonei principale se găseşte o zonă cu niveluri excitate. Aceste zone se pot suprapune parţial. În apropierea temperaturii de zero absolut, zona principală este umplută în întregime cu electroni, iar zona de niveluri excitate, aflată în imediata ei apropiere sau care se suprapune parţial cu ea, este liberă. De aceea, electronii din zona principală au în principiu posibilitatea de a trece de la unele niveluri la altele mai înalte. Această trecere nu se produce de la sine. Dacă se aplică însă corpului un cîmp electric exterior, sub influenţa acestuia electronii vor începe să se deplaseze dirijat, schimbîndu-şi în acest caz energia şi trecînd la niveluri mai înalte. Ca rezultat, va apărea conducţia.

Să analizăm acum structura zonelor de energie ale electronilor de valenţă ai unui semiconductor, reprezentată schematic în fig. 4. La temperatura de zero absolut, ultima zonă completă 1 este umplută în întregime cu electroni de valenţă. După aceea urmează o zonă interzisă, iar deasupra se găseşte zona liberă 2, care a căpătat denumirea de „zonă de conducţie". Pentru ca să apară conductibilitatea electrică, este necesar ca un număr oarecare de electroni să treacă din

zona umplută complet (numită zona ocupată) în cea liberă, unde ei s-ar putea deplasa sub acţiunea cîmpului electric exterior. În caz contrar, chiar dacă ar exista un cîmp electric, conducţia nu ar putea apărea, deoarece în zona de energie umplută complet electronii nu şi-ar putea schimba starea. În cazul cel mai bun, ei şi-ar putea schimba „locurile". Acest schimb nu are însă nici o influenţă asupra stării generale a electronilor. Pentru ca în semiconductor să apară un curent, este necesar ca o parte din electronii din zona principală să treacă în zona superioară de niveluri excitate. Pentru ca un

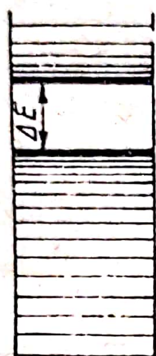


Fig. 4. Schema zonelor energetice ale electronilor de valenţă ai unui semiconductor

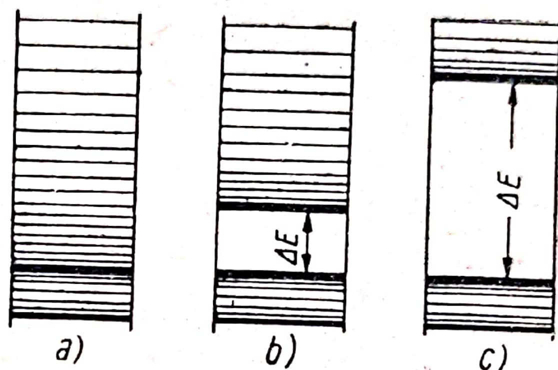


Fig. 5. Structura energetică a spectrului electronilor de valenţă ai unui metal, unui semiconductor şi unui izolant

electron să poată însă săvîrşi trecerea în zona liberă, este necesar să i se comunice o cantitate oarecare de energie ΔE. Deplasarea electronilor spre niveluri de energie mai înalte este imposibilă fără a se absorbi energie din exterior şi, în consecinţă, nu este posibilă nici apariţia curentului electric. Prin urmare, existenţa unei zone energetice interzise cu „lăţimea" ΔE, unde mărimea ΔE — pentru diferite semiconductoare — are valori de la cîteva zecimi de electron-volt pînă la 1,5 eV, deosebeşte semiconductorul de metal.

Din punctul de vedere al acestor concepţii, devine evident răspunsul la întrebarea ce sînt materialele izolante. Materialele izolante sînt substanţe care se caracterizează prin faptul că „lăţimea" ΔE a zonei interzise, are o valoare relativ mare — de la 1,5 pînă la cîţiva electroni-volţi (fig. 5). Ca o concluzie logică, dintr-un asemenea raţionament rezultă că este imposibil să se traseze o limită de separaţie netă între semi-

conductoare și materialele izolante, numai în funcție de mărimea ΔE. In multe privințe, acest criteriu este însă cît se poate de caracteristic și joacă un rol important în teoria semiconductoarelor.

Prin urmare, numai un metal (fig. 5 *a*) posedă întotdeauna — în orice condiții — o conductibilitate electrică bună. Materialele izolante și semiconductoarele au o rezistivitate foarte mare la o temperatură apropiată de zero absolut. S-ar părea că și semiconductoarele (fig. 5 *b*), chiar la temperatura camerei, ar trebui să conducă foarte slab curentul, din cauza existenței zonei interzise ΔE. În realitate, se observă însă o altă situație, ale cărei cauze fizice vor fi examinate mai jos.

Prezența zonelor de energie permite să se înțeleagă mecanismul conductibilității electrice a semiconductoarelor. Pentru ca un electron să poată trece dintr-o zonă completă în zona de conducție, energia lui trebuie mărită cu cantitatea ΔE. La majoritatea semiconductoarelor, valoarea numerică a mărimii ΔE este cuprinsă între limitele 0,1—1 eV. De unde, de la ce surse poate căpăta electronul această energie? Există multe asemenea surse și am vorbit deja despre ele. Sursa principală este mișcarea termică a atomilor substanței semiconductoare. La temperaturi obișnuite, energia termică medie a unei particule nu depășește 0,04 eV, în timp ce cantitatea de energie care este necesară să fie absorbită pentru ca un electron legat al semiconductorului să poată deveni un electron de conducție, este de aproximativ 30 de ori mai mare. De aici ar rezulta că mișcarea termică nu este capabilă să treacă electroni din zona ocupată în zona de conducție. Lucrurile nu stau însă astfel. Este vorba de faptul că mișcarea termică este un proces haotic, care posedă caracter statistic, adică un proces la care participă un număr colosal de particule. Un asemenea proces, ca de altfel și oricare alt proces la care iau parte un număr foarte mare de obiecte, prezintă întotdeauna fluctuații, adică abateri de la uniformitate, de la valoarea medie. Aceste fluctuații, care există la orice temperatură, condiționează existența unui număr oarecare de atomi cu energiile termice de ordinul a 1 eV și chiar mai mult. Atomii de acest fel, la ciocnirea cu electronii legați vecini, le pot transmite energia lor, cu totul suficientă pentru ca un asemenea electron să treacă în zona de conducție.

Dacă nu ar exista fluctuații termice, care să atingă valori și mai mari decît un electron-volt, majoritatea semiconductoarelor pure nu ar conduce deloc pînă la temperatura lor de

topire. Odată cu creşterea temperaturii, mişcarea termică devine mai intensă, numărul de fluctuaţii se măreşte, iar odată cu el devine mai mare şi numărul de electroni de conducţie. Invers, o dată cu scăderea temperaturii numărul de fluctuaţii se micşorează, iar simultan devine mai mic şi numărul de electroni de conducţie, ajungînd pînă la zero la temperatura de zero absolut.

La descrierea procesului fizic de apariţie a conductibilităţii electrice a semiconductoarelor a trebuit să se introducă noţiuni şi termeni noi. În legătură cu aceasta vom face două observaţii. Cînd se vorbeşte sau se scrie despre semiconductoare, se amintesc în mod inevitabil zonele de energie, adică zonele de conducţie, zonele interzise şi cele ocupate. Aceste noţiuni sînt cît se poate de clare pentru un fizician şi el ştie cu ce are de-a face; pentru un cititor neexperimentat, însă, aceste noţiuni duc uneori la confuzii. Adesea, cititorii care nu sînt fizicieni ca specialitate, capătă impresia eronată că un cristal este un corp compus chipurile din zone de energie: ocupate, interzise şi de conducţie. În realitate nu există nimic asemănător. Introducerea zonelor de energie constituie o interpretare teoretică care este, fără îndoială, justificată. Trebuie să se amintească însă că această noţiune reflectă numai starea energetică a electronilor dintr-un corp solid. Corpul solid însuşi nu este alcătuit cîtuşi de puţin din zone, ci din particule-atomi, ioni sau molecule — care formează reţeaua cristalină. Cînd vorbim despre electronii dintr-o zonă ocupată sau liberă, nu avem în vedere în acest caz nici un fel de electron care s-ar găsi în zone ce au dimensiuni geometrice spaţiale, Cînd este vorba de electronii dintr-o zonă ocupată sau liberă, aceasta înseamnă că arătăm numai faptul că aceşti electroni posedă energii ale căror valori extreme sînt determinate de limitele zonelor.

Cînd vorbim despre „trecerea" electronilor dintr-o zonă ocupată în zona de conducţie, trebuie să se aibă în vedere că o asemenea formă de exprimare, cu totul convenţională, nu înseamnă în realitate altceva decît că electronii, în locul energiei anterioare, limitată de valoarea superioară a zonei ocupate, au căpătat acum o energie mai mare, a cărei valoare minimă corespunde în sistemul nostru de coordonate tocmai înălţimii la care se află limita inferioară, sau „fundul" zonei de conducţie. În ce priveşte electronii înşişi, din zonele ocupate şi libere, ei sînt în realitate distribuiţi în întregul volum al reţelei cristaline. Electronii de pe orbitele interioare

sînt legaţi de atomii lor. Electronii de valenţă, însă, sînt legaţi fie de atomii lor, fie — dobîndind o energie corespunzătoare unor valori mai mari decît valoarea limitei inferioare a zonei libere — devin, datorită acestui fapt, electroni de conducţie şi încep să rătăcească prin întreg volumul corpului.

Din toate acestea rezultă că trecerea unui electron dintr-o zonă ocupată în una liberă nu înseamnă altceva decît smulgerea electronului din atomul propriu. Prin urmare, unul şi acelaşi fenomen fizic poate fi exprimat într-o formă deosebită, folosind cuvinte diferite. În procesul mişcării termice, atomii se ciocnesc unul cu altul. În acest caz, unii dintre ei îşi pierd electronii, care capătă posibilitatea de a rătăci liber prin întreg volumul corpului şi, în consecinţă, de a deveni electroni de conducţie. Această descriere cît se poate de clară şi inteligibilă a procesului care se desfăşoară într-un corp solid, poate fi redată în alte cuvinte, folosind noi noţiuni „zonele de energie". Un electron legat de un atom este un electron, „care se află" într-o zonă ocupată. Acest electron nu participă la formarea curentului electric. Un electron care şi-a părăsit atomul propriu este un electron care „a păşit" în zona de conducţie. Un asemenea electron participă direct la formarea curentului electric, deci condiţionează conductibilitatea electrică a corpului solid.

După aceste observaţii, vom trece din nou la explicarea mecanismului conductibilităţii electrice a semiconductoarelor. Factorul hotărîtor care determină conductibilitatea lor electrică este existenţa mişcării termice. Numeroase date experimentale arată însă convingător că în afară de acest factor, asupra valorii conductibilităţii electrice a unui semiconductor are o influenţă dintre cele mai puternice introducerea în semiconductor a unor impurităţi (adaosuri), adică a unor atomi de alte elemente. Introducerea într-un semiconductor a unei cantităţi infime de adaosuri măreşte extraordinar de mult, uneori de zeci de milioane de ori, conductibilitatea semiconductoarelor. În metale se observă o situaţie absolut inversă: introducerea unor adaosuri micşorează valoarea conductibilităţii electrice a metalelor. Analiza amănunţită a rolului adaosurilor a arătat că mecanismul conducţiei electrice este determinat, în linii generale, tocmai de atomii adaosurilor. Mai mult încă, s-a descoperit că în natură practic nu există semiconductori complet puri, ci se întîlnesc — în special — numai semiconductoare cu impurităţi. Pentru a explica influenţa impurităţilor, vom studia structura energetică a unui semi-

conductor, reprezentată schematic în fig. 6. În cazul unui semiconductor absolut pur, furnizorul de electroni pentru zona de conducţie este zona ocupată. În acest caz este necesar ca energia electronilor să fie mărită cu cantitatea ΔE. Să introducem acum în semiconductor un adaos care măreşte de mai multe ori conductibilitatea electrică a substanţei. Creşterea de mai multe ori a conductibilităţii electrice δ poate însă însemna o creştere identică a numărului de electroni de conducţie. Pe de altă parte, se ştie că creşterea numărului de electroni din zona de conducţie poate avea loc, în primul rînd, datorită creşterii temperaturii, iar în al doilea rînd — din cauza micşorării lăţimii zonei interzise ΔE. Ultima împrejurare este cît se poate de clară din punct de vedere fizic. În adevăr, cu cît ΔE este mai mic, adică cu cît este mai mică energia care trebuie comunicată electronului pentru ca el să treacă dintr-o zonă ocupată în zona de conducţie, cu atît va fi mai mare numărul de electroni care vor reuşi — dacă toate celelalte condiţii sînt identice — să ajungă acolo. Deoarece în cazul considerat de noi temperatura nu variază, rămîne să se presupună că introducerea adaosurilor favorizează într-un mod oarecare trecerea electronilor în zona de conducţie.

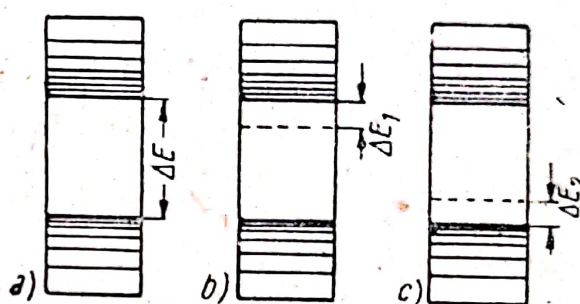


Fig. 6. Nivelurile de energie ale adaosurilor dintr-un semiconductor:
a — semiconductor fără adaosuri, *b* — niveluri donoare, *c* — niveluri acceptoare

Comparînd un mare număr de date experimentale, fizicienii au ajuns la concluzia că nivelurile de energie ale electronilor adaosurilor de un anumit fel sînt aşezate în apropierea zonei de conducţie, ajungînd în felul acesta în interiorul zonei interzise. Fiind surse de electroni care trec în zona de conducţie, atomii adaosurilor cedează uşor aceşti electroni, deoarece nivelurile lor de energie au o valoare mai mare decît nivelurile de energie ale electronilor din zona ocupată. În consecinţă, pentru trecerea într-o zonă liberă, electronii impurităţilor trebuie să-şi mărească energia cu valoarea ΔE_1, despre care se ştie că este mai mică decît ΔE. La temperatura de zero absolut, nivelurile adaosurilor de acest fel sînt completate în întregime, iar la temperaturi mai mari decît zero absolut ele cedează electronii lor în zona liberă şi anume

cu atît mai intens, cu cît temperatura substanței este mai înaltă.

Nivelurile energetice ale adaosurilor, care sînt complet ocupate la temperatura de zero absolut și își cedează electronii în zona liberă la temperaturi diferite de zero absolut, se numesc niveluri donoare, iar adaosurile înșile se numesc adaosuri donoare*) (fig. 6 *b*).

Există de asemenea adaosuri cu totul de altă natură, care au căpătat denumirea de acceptoare. Spre deosebire de nivelurile donoare, cele acceptoare sînt așezate în apropierea unei zone ocupate (fig. 6 *c*). La temperatura de zero absolut nivelurile acceptoare sînt libere, adică nu sînt ocupate. În consecință, la temperaturi diferite de zero absolut, la acest nivel pot sosi electroni din zona ocupată. Este cît se poate de evident faptul că dacă există mișcarea termică a atomilor și electronilor și dacă există în mod obligatoriu fluctuații termice, acestea din urmă — după toate probabilitățile — vor muta electronul din zona ocupată la nivelul acceptor al adaosurilor, la fel cum l-ar duce zona liberă. Dece? Fiindcă $\Delta E_2 < \Delta E$ și la temperatura T, la nivelurile adaosurilor vor sosi un număr considerabil mai mare de electroni decît în aceleași condiții în zona liberă. Cu cît temperatura T este mai înaltă, cu atît este mai mare numărul de electroni care va pleca din zona ocupată ajungînd la nivelurile acceptoare ale adaosurilor. Plecarea electronilor din zona ocupată dă însă posibilitatea electronilor care au rămas acolo să participe și ei la procesul de conducție. În adevăr, dacă în zona ocupată vor apărea niveluri libere din cauza plecării electronilor de acolo, este natural că la aceste niveluri vor începe să sosească — sub acțiunea cîmpului electric exterior — alți electroni din aceeași zonă. Prin urmare, plecarea parțială a electronilor din zona ocupată condiționează posibilitatea reală a deplasării electronilor care au rămas în acea zonă, de la niveluri relativ joase la niveluri mai înalte și, invers, de la niveluri mai înalte la altele mai joase, între limitele acestei zone, care pînă atunci era ocupată complet cu electroni. Dar care sînt urmările faptului că devine posibilă deplasarea electronilor în zona ocupată? Dacă în zona liberă sau la nivelurile adaosurilor acceptoare au ajuns, din zona ocupată, un număr oarecare de electroni, în acea zonă vor rămîne exact

*) Trebuie observat că în unele lucrări nu se utilizează termenul de *adaos*, ci de *impuritate*.

acelaşi număr de locuri libere, adică de niveluri neocupate. Existenţa acestor niveluri „vacante" face ca electronii rămaşi în zona ocupată să capete posibilitatea de a se deplasa între limitele acestei zone. Să admitem că de la un nivel oarecare *A* al zonei ocupate a plecat un electron. Atunci, în locul nivelului ocupat apare un nivel liber, vacant, sau un „gol", termen care nu este tocmai adecvat. Acest gol se umple imediat cu un electron vecin oarecare, cel mai apropiat, dar în locul de unde a plecat acest electron vecin se formează un nou loc gol, care la rîndul lui va fi umplut de un alt electron oarecare. Acest electron va lăsa şi el în urmă un gol, etc.

Să ne imaginăm că semiconductorului i se aplică o diferenţă de potenţial. Ce se întîmplă în acest caz? Sub influenţa cîmpului electric, electronii din zona ocupată vor începe să se deplaseze în sens invers cîmpului electric. În cazul unei asemenea deplasări preferenţiale a electronilor, golurile — după toate probabilităţile — vor fi umplute tocmai cu acei electroni, care se apropie de ele sub acţiunea cîmpului. Dar aceşti electroni vor lăsa în urmă noi goluri, care de asemenea vor fi umplute cu electroni ce se deplasează în sens invers cîmpului. Ca rezultat al acestui proces, în semiconductorul care se găseşte într-un cîmp electric, electronii se vor deplasa de la polul pozitiv la cel negativ, în timp ce golurile se vor mişca în sens invers. In consecinţă, dacă într-un semiconductor electronii — sub acţiunea unei diferenţe de potenţial — se deplasează de pildă de la stînga spre dreapta, golurile se vor deplasa de la dreapta spre stînga. Acestea sînt caracteristicile mişcării golurilor şi electronilor într-un cîmp electric.

Să încercăm acum să înţelegem mai profund ce înseamnă un gol. Evident, dacă dintr-un loc oarecare al unei reţele cristaline a plecat un electron, proces în urma căruia în acel loc a apărut un gol, acest fapt este echivalent cu a spune că în locul respectiv şi-a făcut apariţia o sarcină pozitivă. In adevăr, orice insuficienţă de electroni într-un corp anterior neutru este echivalentă cu un surplus cantitativ identic de sarcini pozitive. Aşa dar, orice gol se comportă ca şi cînd el ar fi o sarcină pozitivă.

In realitate, într-un semiconductor se vor deplasa numai electronii, dar în exterior mişcarea electronilor se va manifesta în mod diferit, în funcţie de care electroni participă — sub acţiunea cîmpului — la mişcarea dirijată. Dacă curentul electric este realizat numai de electronii din zona ocu-

pată, ceea ce se observă într-un semiconductor cu adaosuri acceptoare, mişcarea purtătorilor corespunde unei mişcări de sarcini pozitive. În cazul cînd diferenţa de potenţial este aplicată unui semiconductor cu adaosuri donoare, purtători de curent vor fi numai electronii care se găsesc în zona liberă.

Prin urmare, sînt posibile două tipuri de conducţie electrică: electronică şi prin goluri. Primul corespunde deplasării electronilor în zona liberă, cel de-al doilea — mişcării electronilor sau golurilor pozitive în zona ocupată. Primul tip este provocat de adaosuri donoare, iar cel de-al doilea — de adaosuri acceptoare.

Dar care este mecanismul conducţiei ce apare într-un semiconductor pur, fără adaosuri, care posedă o reţea cristalină ideală? Sub acţiunea fluctuaţilor termice, electronii din zona ocupată sînt aruncaţi în zonă liberă, adică în zona de conducţie, în care ei se comportă aproximativ la fel cu electronii liberi ai unui metal. S-ar părea, la prima vedere, că în acest caz avem de-a face cu un mecanism de conducţie tipic electronic. O asemenea concluzie ar fi însă pripită. În adevăr, simultan cu trecerea electronilor din zona ocupată în zona de conducţie, în prima apar goluri capabile de a se deplasa sub acţiunea cîmpului electric, dînd naştere în felul acesta unui curent de goluri. Fireşte, în aceste condiţii, numărul electronilor de conducţie va corespunde exact numărului de goluri. Dacă se aplică apoi unui semiconductor pur de acest fel un cîmp electric exterior, sub acţiunea lui electronii de conducţie se vor deplasa în sens invers cîmpului, creînd un curent de electroni, iar golurile vor începe să se mişte în sensul cîmpului, formînd curentul de goluri. În consecinţă, curentul total dintr-un asemenea semiconductor va fi compus din doi curenţi: unul electronic şi altul de goluri, iar valoarea lui va fi

$$I = I_{el} + I_{gol}.$$

Dar

$$I_{el} = n_{+}eu_{-}SE$$

şi

$$I_{gol} = n_{+}eu_{+}SE$$

În consecinţă,

$$I = n_{-}eu_{-}SE + n_{+}eu_{+}SE,$$

unde n_+ şi n_- sînt concentraţia golurilor şi, respectiv, a electronilor;

e — sarcina electronului şi a golului;

u_+ şi u_- — mobilitatea golurilor şi, respectiv, a electronilor, adică vitezele lor medii de deplasare sub influenţa unui cîmp electric de 1 V/cm;

E — intensitatea cîmpului electric;

S — aria secţiunii transversale a semiconductorului.

Partea electronică a curentului total I nu este egală cu cea de goluri, adică $I_{el} \neq I_{gol}$. In ciuda egalităţii depline a concentraţiilor electronilor şi golurilor, curentului electronic I_{el} este totuşi mai mare decît curentul de goluri I_{gol}. Aceasta se întîmplă datorită faptului că, în majoritatea cazurilor, mobilitatea electronilor este ceva mai mare decît mobilitatea golurilor şi, de aceea, componenta electronică a curentului I va predomina asupra componentei sale de goluri. Tocmai de aceea un semiconductor pur, fără adaosuri, prezintă un mecanism de conducţie electronică puţin accentuat.

Menţionăm în treacăt că conducţia observată la semiconductoarele fără adaosuri, se numeşte conducţie proprie, iar aceste semiconductoare sînt numite semiconductoare intrinsece. Conducţia condiţionată de adaosuri se numeşte însă conducţie prin adaosuri (sau extrinsecă), iar semiconductoarele care posedă adaosuri au căpătat denumirea de semiconductoare cu adaosuri.

Semiconductoarele cu adaosuri donoare se numesc electronici sau semiconductoare *n*. Semiconductoarele cu adaosuri acceptoare se numesc cu goluri, sau semiconductoare *p*. Aceste litere provin de la sarcina „negativă" a electronului şi sarcina „pozitivă" a golului.

In fiecare substanţă semiconductoare reală, caracterul conducţiei este de fapt determinat de temperatura semiconductorului: în cazul unor temperaturi suficient de scăzute, conductibilitatea electrică este condiţionată mai ales de impurităţi. Pe măsură ce se măreşte temperatura, creşte numărul de fluctuaţii capabile de a arunca — în zona liberă — un număr mai mare de electroni din zona inferioară. In fine, în cazul unor temperaturi suficient de înalte, intră în funcţiune complet conductibilitatea proprie (intrinsecă) a substanţei.

Studiind influenţa adaosurilor (impurităţilor) asupra mecanismului conducţiei în semiconductoare, nu se poate să nu observăm că rolul de impurităţi este îndeplinit nu numai de atomii unor substanţe străine. Acelaşi efect apare şi în cazul cînd „impurităţi" sînt chiar atomii elementelor care formează un compus semiconductor oarecare. Numai că în acest caz este necesar să existe un număr suplimentar de atomi ai unui element component, peste raportul determinat de formula chimică a semiconductorului respectiv. Totodată, în majoritatea cazurilor, existenţa unui număr de atomi suplimentari de metal duce la o conducţie electronică, în timp ce un număr suplimentar de atomi de metaloid atribuie semiconductorului o conducţie prin goluri. Astfel, de exemplu, în cazul sulfurii de taliu (Tl_2S) surplusul de taliu condiţionează o conducţie electronică, iar surplusul de sulf — o conducţie prin goluri; la sulfura de plumb (P_bS), surplusul de plumb provoacă o conducţie electronică, iar surplusul de sulf — o conducţie prin goluri etc. Deşi această regulă nu poate fi extinsă la toate semiconductoarele, totuşi ea este satisfăcută cu suficientă rigurozitate de către multe substanţe.

6. SEMICONDUCTOARE ÎN CÎMPURI ELECTRICE PUTERNICE

Legea lui Ohm, descoperită de fizicianul german Ohm în 1827, este valabilă absolut pentru toate metalele, fără excepţie. Între altele, ea reflectă faptul că rezistivitatea ρ a metalelor nu depinde de diferenţa de potenţial aplicată unui conductor metalic. Pentru fiecare metal, ρ este o mărime care depinde numai de temperatură. O altă situaţie se observă însă la substanţele semiconductoare. Cercetările efectuate de diferiţi oameni de ştiinţă au stabilit că în cazul semiconductoarelor legea lui Ohm se păstrează numai pînă la o anumită limită, deasupra căreia ea nu mai este respectată. Nerespectarea acestei legi clasice este legată de faptul că rezistivitatea ρ a semiconductoarelor nu rămîne o mărime constantă în întreg intervalul de tensiuni aplicate, ci începînd de la o valoare oarecare E_{cr} a intensităţii cîmpului electric, începe să scadă odată cu creşterea ulterioară a intensităţii cîmpului.

Studiul experimental amănunţit al acestei particularităţi a comportării semiconductoarelor a arătat că pînă la o anumită valoare a intensităţii cîmpului electric aplicat semiconductorului, concentraţia n a purtătorilor de curent — elec-

troni sau goluri — rămîne constantă. De aceea, odată cu creşterea intensităţii E a cîmpului electric se măreşte numai viteza medie v a mişcării dirijate a purtătorilor. O asemenea variaţie a lui v în funcţie de E duce la o creştere liniară a intensităţii cîmpului electric odată cu creşterea lui E (fig. 7). Dacă pe axa ordonatelor se notează intensitatea I a curentului, iar pe axa absciselor — intensitatea E a cîmpului electric, graficul care exprimă variaţia lui I în funcţie de E, între limitele intervalului $O - E_{cr}$ va fi o linie dreaptă. Această porţiune rectiliniară ilustrează faptul că, în semiconductorul considerat, legea lui Ohm este valabilă între limitele de la O pînă la E_{cr} şi că viteza medie dirijată v a purtătorilor de curent, creşte liniar odată cu creşterea lui E.

Intensitatea I a curentului care circulă prin semiconductor se determină cu următoarea formulă :

$$I = neuSE$$

unde n este concentraţia sarcinilor ;
- e — valoarea unei sarcini ;
- u — mobilitatea sarcinilor ;
- S — aria secţiunii transversale a semiconductorului ;
- E — intensitatea cîmpului electric.

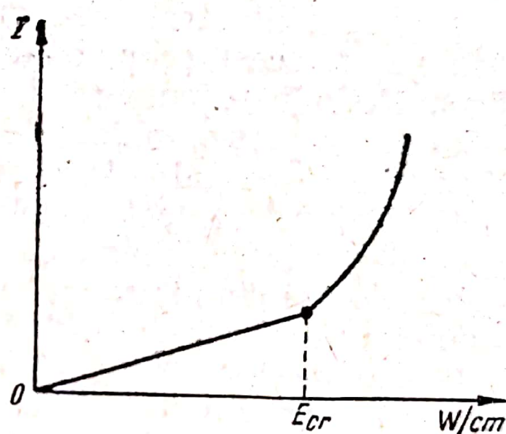


Fig. 7. Variaţia intensităţii curentului în funcţie de intensitatea cîmpului electric dintr-un semiconductor

Pînă la o anumită limită, adică pînă la momentul cînd E atinge valoarea E_{cr} mărimea n este constantă. Intre aceleaşi limite produsul neS este şi el o mărime constantă. Să notăm această mărime cu litera B. In acest caz, expresia precedentă pentru curentul I va căpăta forma :

$$I = Bv,$$

unde $v = uE$, adică va reprezenta ecuaţia unei drepte. In momentul cînd E atinge valoarea E_{cr} concentraţia n a sarcinilor va înceta să mai fie o mărime constantă şi va începe să crească odată cu creşterea ulterioară a cîmpului electric. Creşterea lui n duce la o scădere a rezistivităţii ϱ a semiconductorului care, în cazul unor cîmpuri electrice suficient de puternice, se poate micşora de mai multe ori.

Acest fenomen — scăderea bruscă a rezistivității semiconductorului cînd acestuia i se aplică o diferență mare de potențial — și-a găsit aplicații practice. Pe acest fenomen se bazează construcția rezistențelor neliniare — așa — numitele varistoare.

Pentru un număr considerabil de substanțe semiconductoare, valoarea lui E_{cr} variază în jurul a 10 000 V/cm.

7. REDRESAREA

Dacă o plăcuță de cupru este încălzită în aer, timp de cîteva minute, la temperatura de 1020...1040°C, ea se va acoperi cu un strat de oxid de cupru (Cu_2O). Se poate face în așa fel, încît stratul de oxid să acopere numai o parte a plăcuței. În acest scop, oxidarea se efectuează în modul următor. Pe o placă-suport masivă din cupru, cu grosimea de 4—5 mm, se așază plăcuțe subțiri de cupru, cu o parte care trebuie să fie oxidată. În mod obișnuit, plăcuțele de cupru de acest fel sînt confecționate sub forma unor discuri. După aceea, suportul împreună cu discurile de cupru așezate pe el se introduce într-un cuptor electric, încălzit în prealabil pînă la temperatura necesară. În cuptor are loc procesul următor. Toate părțile exterioare ale discurilor de cupru se acoperă, după 10—15 minute, cu un strat relativ gros de oxid de cupru; în ce privește părțile acoperite, ele nu se vor oxida aproape deloc, deoarece discurile aderă bine la suprafața suportului, iar oxigenul care se găsește în aer nu poate pătrunde decît extrem de greu la ele.

Un asemenea disc de cupru cu strat de oxid de cupru, după cum se dovedește, posedă proprietăți absolut surprinzătoare.

Să depunem pe suprafața oxidului de cupru un strat subțire de metal, de exemplu argint. Să alcătuim apoi un circuit electric: de la polul negativ al unei baterii vom duce un conductor la un galvanometru, iar de la acesta — la suprafața de cupru a discului; polul pozitiv al bateriei îl vom lega la electrodul metalic superior, adică la stratul de argint (fig. 8). Prin acest circuit închis va circula un curent. Notăm indicațiile galvanometrului. Să schimbăm acum polaritatea, adică să conectăm stratul de argint la polul negativ al bateriei, iar polul pozitiv — la suprafața de cupru. Ne uităm din nou la acul galvanometrului. Observăm că el de-abia, de-a-

bia a deviat din poziția lui de zero, adică intensitatea curentului electric care circulă prin plăcuța de cupru pe care este depus un strat de oxid de cupru s-a micșorat considerabil. Dacă dorim să calculăm această scădere, vom constata că curentul care circulă într-un sens este de multe ori mai mic decît curentul care circulă în sens invers. De aici rezultă că discul de cupru cu strat de oxid de cupru posedă o așa-numită conductibilitate electrică unidirecțională, adică permite trecerea curentului într-un sens și nu o permite aproape deloc în sens contrar. La început, fizicienii n-au putut să elucideze cauzele acestei proprietăți a plăcuței de cupru oxidate, ea părîndu-le cu totul neobișnuită, și de-abia mult mai tîrziu a fost lămurită natura acestui fenomen.

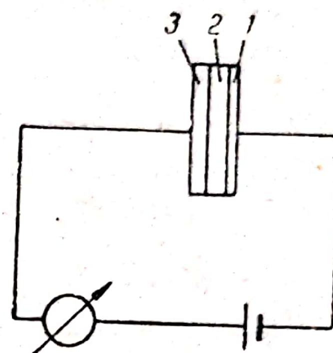


Fig. 8. Redresorul cu oxid cupros într-un circuit electric:
1 — electrod metalic superior, 2 — strat de Cu_2O, 3 — electrod inferior

Materialul experimental vast și concepțiile teoretice moderne bazate pe el, au arătat că — dacă se respectă anumite condiții — un sistem de două semiconductoare care vin în contact, unul electronic iar celălalt cu goluri, posedă proprietatea de a redresa curentul alternativ. Într-un asemenea sistem, redresarea apare deoarece în cazul atingerii a două semiconductoare, unul electronic și celălalt cu goluri, la limita de separație dintre ele și parțial și în interiorul lor, se formează un strat foarte subțire, care a căpătat denumirea de „strat de blocare“ *). Grosimea acestui strat este de ordinul 10^{-5}—10^{-6} cm. Stratul de blocare posedă o proprietate remarcabilă: în funcție de sensul curentului care circulă prin el, rezistența lui devine cînd foarte mare, cînd foarte mică. Este cît se poate de clar că un sistem format dintr-un semiconductor electronic, unul cu goluri și un strat de blocare, introdus într-un circuit de curent alternativ, va lăsa să treacă curentul practic numai într-un singur sens și aproape deloc în sens invers. În consecință, un sistem de acest fel poate fi folosit drept redresor, adică drept dispozitiv care transformă curentul alternativ în curent continuu.

Pentru a se înțelege mecanismul formării stratului de blocare și rolul lui în procesul de redresare, să studiem acele procese fizice, care se produc în cazul cînd un semiconductor cu goluri este în contact cu unul electronic.

*) Se mai utilizează și denumirea de „strat de baraj“.

Cînd două corpuri diferite se ating unul cu altul, la capetele lor libere se observă o oarecare diferență de potențial, a cărei valoare nu depinde cîtuși de puțin de forma și dimensiunile geometrice ale acestor corpuri și este determinată numai de natura lor fizică. Această diferență de potențial a căpătat numele de „diferență de potențial de contact". Cum se formează ea? Pentru a înțelege acest lucru, este necesar să se spună la început cîteva cuvinte despre împrejurările în care un electron poate părăsi corpul în care se află. Găsindu-se în interiorul volumului unui corp oarecare, electronii liberi interacționează cu alți electroni vecini și cu nucleele încărcate pozitiv ale atomilor. Deoarece în interiorul substanței electronii și nucleele atomice sînt distribuite, în medie, absolut uniform, forțele de interacțiune dintre ei sînt dirijate în cele mai diverse direcții și se compensează una pe alta. Alta este însă situația cînd electronul se găsește chiar la suprafața corpului. In acest caz, forțele de interacțiune sînt îndreptate spre interior. Ele tind să mențină electronul în interiorul substanței. De aceea, pentru a scoate electronul în afara corpului, este necesar să se efectueze un lucru mecanic oarecare pentru învingerea acestor forțe „superficiale". Valoarea lucrului mecanic amintit, care a căpătat denumirea de „lucru de ieșire" al electronului, este diferită pentru diversele substanțe și, pentru elementele pure din tabloul lui Mendeleev, variază aproximativ între 2 și 5 eV.

Cînd corpurile se găsesc la temperatura camerei sau la temperaturi încă și mai scăzute, electronii liberi nu pot părăsi corpul prin forțe proprii și ieși în spațiul înconjurător. Acest lucru este împiedicat de „forțele superficiale". Găsindu-se în asemenea condiții de temperatură, electronii posedă în medie o energie care nu este suficientă pentru învingerea acestor forțe. O dată cu creșterea temperaturii, numărul ciocnirilor dintre atomi pe secundă se mărește și, în plus, crește și forța de șoc. Se poate întîmpla ca un atom oarecare, foarte rapid, să se ciocnească de un electron liber care i se nimerește în cale, și anume în așa fel, încît direcția șocului să coincidă cu direcția de mișcare a electronului spre suprafața cea mai apropiată a corpului. Firește, căpătînd o viteză mai mare, prin urmare și o energie cinetică mai mare, electronul va putea în acest caz să învingă forțele de interacțiune care apar la suprafața corpului și să scape în exterior. Pe măsură ce temperatura se mărește, crește numărul de electroni care evadează în afară. Acest fenomen, numit „emisiune termoelec-

tronică“, este folosit pe scară largă în diferite ramuri ale științei și tehnicii.

Neavînd posibilitatea de a scăpa în exterior atunci cînd corpul se află la temperaturi joase, electronii pot totuși să treacă dintr-un corp în altul, atunci cînd între acestea există un contact sigur. Este ușor de înțeles că în acest caz se modifică radical împrejurările care duc la formarea forțelor superficiale, deoarece condițiile în care se găsesc electronii marginali se aseamănă cu condițiile în care se găsesc electronii în interiorul substanței : asupra acestor electroni acționează forțe atît din partea unui corp, cît și din partea celuilalt.

Dar care sînt cauzele ce obligă electronii să treacă dintr-un corp în celălalt ? Această trecere are loc atunci cînd vin în contact unul cu altul, corpuri alcătuite din substanțe care posedă lucruri de ieșire de valori diferite. In acest caz, electronii vor începe să treacă din substanța cu lucrul de ieșire mai mic, în substanța la care lucrul de ieșire este mai mare. Se înțelege de la sine că această trecere nu poate continua la infinit. De ce oare ? Fiindcă pe măsură ce electronii trec dintr-un corp în celălalt, numărul lor devine mai mic în primul corp și se mărește în cel de-al doilea. Aceasta duce la încărcarea pozitivă a primului corp, în timp ce al doilea se încarcă negativ. De o parte și de alta a limitei de separație a corpurilor apare o așa-numită sarcină electrică spațială, de semne diferite. Simultan cu apariția sarcinii, se ivește însă și un cîmp electric de contact, care crește odată cu acumularea sarcinilor și este îndreptat de la substanța cu lucru de ieșire mai mic spre substanța al cărei lucru de ieșire este mai mare. Intensitatea acestui cîmp, crescînd mereu, provoacă un flux electronic crescător dirijat în sens invers. In fine, pentru o valoare oarecare a intensității cîmpului electric, fluxurile de electroni care trec într-un sens și în celălalt se egalizează, se ajunge la un echilibru dinamic și între un corp și celălalt se stabilește o diferență de potențial de contact strict determinată.

Diferența de potențial de contact creează condițiile necesare pentru formarea stratului de blocare, care apare la limita dintre un semiconductor cu goluri și unul electronic.

Să punem în atingere două semiconductoare de acest fel, despre care știm dinainte că lucrul de ieșire al electronilor din semiconductorul cu goluri este mai mare decît lucrul de ieșire corespunzător semiconductorului electronic. In ase-

menea condiţii, cîmpul electric de contact care se formează, acţionînd asupra electronilor de conducţie din semiconductorul electronic, îi va îndepărta pînă la o oarecare distanţă de limita de separaţie. Pe de altă parte, acelaşi cîmp electric de contact, acţionînd asupra golurilor din substanţa cu goluri, le împinge pe acestea în adîncul semiconductorului cu goluri, îndepărtîndu-le de limita de separaţie. Ca rezultat, în sistemul considerat va apărea un strat cu grosimea *d*, sărăcit în ce priveşte purtătorii de electricitate. Limita de separaţie a celor doi semiconductori se află chiar în interiorul acestui strat. Prin urmare, stratul sărac în purtători cuprinde o parte din semiconductorul cu goluri şi o parte din cel electronic. Rezistivitatea unui asemenea strat, în comparaţie cu rezistivitatea semiconductoarelor aderente la el de o parte şi de alta, este considerabil mai mare şi ajunge la asemenea proporţii, încît — în ciuda grosimii neînsemnate, de circa 10^{-5} cm — rezistenţa lui totală este mult mai mare decît suma rezistenţelor semiconductorului electronic şi celui cu goluri, care alcătuiesc sistemul redresor. Acest strat este tocmai stratul de blocare despre care s-a pomenit mai sus (fig. 9). Să vedem acum în ce mod se va comporta stratul de blocare într-un cîmp electric alternativ exterior. În acest scop vom aplica sistemului nostru o diferenţă de potenţial alternativă. În acest caz, cînd cîmpul electric exterior este dirijat de la semiconductorul electronic spre cel cu goluri, el va mări cîmpul de contact existent anterior şi, din această cauză, electronii din semiconductorul electronic şi golurile din semiconductorul cu goluri se vor îndepărta încă şi mai mult de limita de separaţie, ceea ce va duce la creşterea lăţimii stratului de blocare. Dacă mai înainte, în absenţa cîmpului electric exterior, lăţimea stratului de blocare era *d*, acum ea capătă o nouă valoare, $d_1 > d$. Datorită acestui fapt se măreşte şi rezistenţa stratului de blocare.

Cu totul altceva se va observa atunci cînd semnul diferenţei de potenţial aplicate va fi inversat. În acest caz, cîmpul electric exterior — fiind dirijat de la semiconductorul cu goluri spre cel electronic — poate nu numai să atenueze cîmpul de contact, dar să-l şi echilibreze, datorită cărui fapt lăţimea stratului de blocare va deveni considerabil mai mică decît anterior, sau chiar se va anula. Noua valoare d_2 a lăţimii stratului de blocare, mai mică decît *d*, va duce la o micşorare considerabilă a rezistenţei acestuia.

Prin urmare, stratul de blocare al unui sistem redresor, găsindu-se într-un cîmp alternativ exterior, parcă pulsează. Pulsaţia constă în faptul că grosimea lui cînd se măreşte, cînd se micşorează, ceea ce duce la o variaţie corespunzătoare a rezistenţei totale a stratului, care devine şi ea cînd foarte mare, cînd foarte mică. Acest mecanism de funcţionare a stratului de baraj creează toate condiţiile care asigură conductibilitatea unidirecţională a sistemului redresor. În acest sistem, sensul de trecere (sensul direct) va fi sensul în care cîmpul electric exterior, dirijat de la semiconductorul cu goluri spre cel electronic, obligă electronii şi golurile să se mişte unii în întîmpinarea celorlalţi spre limita de separaţie a celor două semiconductoare. Sensul de blocare a curentului corespunde cazului cînd cîmpul electric exterior obligă electronii şi golurile să se mişte în sensuri opuse.

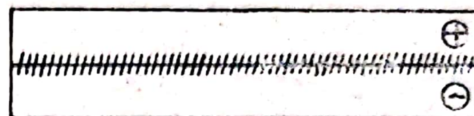


Fig. 9. Stratul de blocare (regiunea haşurată) cuprinde o parte din semiconductorul cu goluri şi o parte din semiconductorul electronic

Introducînd sistemul redresor într-un circuit de tensiune alternativă, se pot redresa curenţii alternativi. În acest caz, în timpul unei semiperioade, curentul va circula prin redresor, iar în decursul celei de-a doua semiperioade va fi atît de slab, încît practic poate să nu fie luat în considerare. Raportul dintre intensitatea I_{tr} în sensul de trecere şi intensitatea I_{bl} a curentului în sensul de blocare, pentru una şi aceeaşi diferenţă de potenţial, se numeşte factor de redresare. Cu cît valoarea numerică a factorului de redresare este mai mare şi, de asemenea, cu cît intensitatea curenţilor care circulă în sensul de trecere este mai mare, cu atît redresorul îşi va îndeplini funcţiunea mai bine.

8. EFECTUL FOTOELECTRIC INTERIOR

În 1873 a fost descoperit un fenomen extrem de interesant, a cărui semnificaţie poate fi înţeleasă din următoarea experienţă. Să alcătuim un circuit electric simplu dintr-o sursă de curent, un galvanometru şi nişte conductoare şi plăcuţe de legătură. De la polul pozitiv al bateriei vom duce un conductor la o plăcuţă prinsă, aşa cum se arată în fig. 10, între doi electrozi şi confecţionată nu dintr-un material obişnuit, ci

din seleniu chimic pur. Apoi, la cel de-al doilea electrod al plăcuței de seleniu vom conecta un conductor care duce la o bornă a galvanometrului, iar de la a doua bornă a galvanometrului vom lega un conductor la polul negativ al bateriei.

După ce vom sfîrşi alcătuirea acestui circuit extrem de simplu, putem proceda la efectuarea experienței. Să acoperim plăcuța de seleniu cu un material opac oarecare, de exemplu cu o muşama groasă, pentru ca pe ea să nu cadă raze de lumină. Deoarece circuitul electric din experiența noastră este închis, prin el va trece un curent electric şi acul galvanometrului va devia din poziția lui medie.

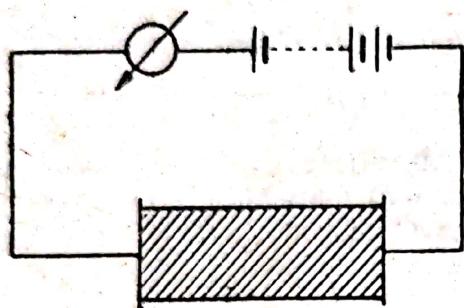


Fig. 10. Plăcuță de seleniu conectată în circuitul unei surse de curent

Ce factori determină intensitatea curentului în circuitul nostru?

Indicațiile galvanometrului sînt condiționate de doi factori: forța electromotoare a bateriei şi valoarea rezistenței întregului circuit.

Evident, rezistența conductoarelor de conexiune din cupru este atît de mică, încît ea poate fi neglijată. În ce priveşte rezistența plăcuței de seleniu, ea este relativ mare, fiindcă seleniul face parte din clasa semiconductoarelor.

Să observăm indicațiile galvanometrului atunci cînd plăcuța se găseşte în obscuritate, iar apoi să luăm de pe ea învelişul de muşama opacă, pe care l-am folosit pentru ca lumina să nu ajungă la seleniu şi să îndreptăm spre plăcuță un flux de lumină intens. Vom observa în acest caz că acul galvanometrului va devia imediat şi se va găsi în această poziție atît timp cît seleniul este supus iluminării. La întunecarea ulterioară a seleniului, acul va reveni în poziția lui inițială. Apare o întrebare firească: de ce intensitatea curentului din circuitul nostru depinde de faptul dacă seleniul este iluminat sau nu?

Este cît se poate de clar că creşterea intensității curentului în cazul iluminării plăcuței de seleniu are loc fiindcă sub acțiunea luminii se micşorează rezistența seleniului.

Explicația este suficient de elementară, dar în egală măsură nici nu spune nimic despre mecanismul intern al unui fenomen atît de neobişnuit. De ce se micşorează rezistența seleniului sub acțiunea luminii? Care sînt forțele ce modi-

fică radical proprietățile fizice ale substanței? De ce nu se observă procese analoge în plăcuțele metalice?

La toate aceste întrebări, știința secolului al XIX-lea nu a putut da un răspuns.

Fizicienii s-au interesat imediat de această descoperire senzațională și au început să studieze amănunțit cele mai variate substanțe, încercînd să găsească și la ele fenomene asemănătoare. Cercetările lor au fost încununate de succes. S-a descoperit că micșorarea rezistenței electrice în timpul iluminării se observă la foarte multe cristale naturale și la semiconductoare produse pe cale artificială. Deosebit de puternic se manifestă acest efect la unii compuși de metale cu sulf sau oxigen. Dintre aceste combinații chimice fac parte: sulfura de taliu, sulfura de plumb, sulfura de argint, oxidul de cupru, sulfura de cadmiu, molibdenitul, stibnitul și multe altele.

Studiul amănunțit al acestui fenomen a arătat că micșorarea rezistenței unui semiconductor fotosensibil își urmează legile ei. S-a dovedit astfel că variația rezistenței unor diverse substanțe apare sub acțiunea luminii de compoziție spectrală diferită: la unele substanțe ea se observă atunci cînd iradierea se face cu raze ultraviolete și raze vizibile, și nu are loc nici un fel de schimbare a conductibilității electrice sub acțiunea radiațiilor infraroșii. La alte substanțe, dimpotrivă, efectul se manifestă cu intensitate maximă tocmai atunci cînd substanța este „iluminată" cu raze infraroșii.

Prin analogie cu efectul fotoelectric exterior, în cazul căruia lumina — acționînd asupra suprafeței unui metal — eliberează electroni din acesta, micșorarea rezistenței electrice — observată în interiorul substanței și provocată de iradierea cu lumină — a fost denumită efect fotoelectric interior, iar apariția unei conductibilități electrice suplimentare, provocată de lumina absorbită, a căpătat denumirea de fotoconductibilitate.

Au trecut cîțiva ani după descoperirea efectului fotoelectric interior. Fizicienii și-au continuat încercările asidue de a dezlega misterul acestui fenomen, neclar la prima privire. S-au organizat experiențe, s-au elaborat teorii, dar fenomenul continua să rămînă de neînțeles. Dar pe măsură ce materialul experimental se acumula din ce în ce mai mult, iar dezvoltarea generală a fizicii semiconductoarelor progresa, a apărut speranța de a înțelege mecanismul fenomenului studiat, care pînă la urmă a fost descifrat.

Dar în ce constă esenţa fizică a efectului fotoelectric interior? În timp ce la metale conducţia este observată la toate temperaturile posibile, în semiconductoare conducţia apare — în condiţii obişnuite — numai datorită mişcării termice. Cu toate acestea, se pot crea condiţii care să asigure apariţia conducţiei într-un semiconductor, indiferent de temperatura acestuia. Deoarece într-un semiconductor electronic conducţia apare numai datorită faptului că electronii ajung în zona liberă, este suficient să se comunice electronilor energia necesară pentru trecerea lor în această zonă, pentru a se putea descoperi apariţia conducţiei. Electronii obţin energia necesară în acest scop de la alte particule care participă la mişcarea termică. Aceeaşi energie poate fi însă purtată şi transmisă electronului nu numai de particulele substanţei însăşi, dar şi de altceva, în particular de o radiaţie. În ultimul caz, într-un semiconductor sau într-un dielectric poate apărea fotoconductibilitatea.

Pentru simplitate, să considerăm un semiconductor cu conducţie electronică.

La o temperatură oarecare T, într-un semiconductor aflat în întuneric, un număr oarecare n de electroni se găsesc în zona liberă. Datorită acestor electroni există conductibilitatea electrică obişnuită a semiconductorului, care mai este numită altfel şi conductibilitate „de obscuritate". Dacă semiconductorul este iradiat cu fotoni de energie corespunzătoare, în zona liberă — în afară de electronii „de obscuritate" care existau acolo anterior — va apărea un nou număr n_1 de electroni „de iluminare", şi numărul total de electroni din zonă va deveni acum $n + n_1$. Ca urmare, conductibilitatea electrică se va mări şi va căpăta valoarea

$$\sigma = neu + n_1eu_1 ,$$

unde primul termen reprezintă conductibilitatea de obscuritate, iar cel de-al doilea — fotoconductibilitatea.

Din cele mai generale concepţii referitoare la natura proprietăţilor electrice ale semiconductoarelor rezultă cît se poate de clar cauza apariţiei fotoelectronilor în zona liberă. Fără îndoială, furnizorul atît de electroni de obscuritate, cît şi de electroni de iluminare este zona ocupată. Se înţelege că atît unii electroni, cît şi ceilalţi, au ajuns în zona liberă numai datorită faptului că au dobîndit energia necesară lor pentru traversarea zonei interzise de „lăţime" ΔE_1. În consecinţă, fotoconductibilitatea a apărut datorită faptului că fotonii care

cad pe suprafaţa conductorului şi sînt absorbiţi de ea au cedat întreaga lor energie fotoelectronilor. Fiecare foton posedă energia $h\nu$. Dacă această energie depăşeşte ca valoare energia ΔE_1, sau este cel puţin egală cu ea, electronul care se găseşte în zona ocupată va putea trece în zona de conducţie. De aici rezultă o consecinţă inevitabilă: fotoconductibilitatea este posibilă atunci cînd $h\nu \geqq \Delta E_1$. Radiaţia poate fi însă de diferite frecvenţe, în particular şi de aceea căreia îi corespunde situaţia $h\nu < \Delta E_1$. În acest caz, fotoconductibilitatea nu apare. . Prin urmare, pentru fiecare substanţă fotosensibilă există un prag de fotoconductibilitate, care corespunde condiţiei.

$$h\nu_0 = \Delta E_1.$$

Dacă frecvenţa ν a radiaţiei incidente pe semiconductor este mai mică decît ν_0, fotoconductibilitatea nu se va ivi. Numai radiaţia cu frecvenţa $\nu \geqq \nu_0$ este capabilă de a produce fotoconductibilitate.

Pragul roşu al efectului fotoelectric, adică valoarea lui ν_0, depinde de însuşi semiconductorul în care se observă efectul fotoelectric, şi anume de faptul dacă el conţine sau nu adaosuri. În cel de-al doilea caz, o importanţă esenţială are caracterul adaosurilor.

Fotoconductibilitatea sau efectul fotoelectric interior, nu apare nici pe departe la toate semiconductoarele, dar — indiferent de aceasta — o condiţie obligatorie a apariţiei fotoconductibilităţii trebuie să fie absorbirea de către substanţă a radiaţiei incidente. Numai în acest caz poate apărea, în principiu, efectul fotoelectric.

Experienţele fizicienilor sovietici au stabilit clar că, în ce priveşte comportarea lor, fotoelectronii nu se deosebesc prin nimic de electronii termici, pînă la coincidenţa practic totală a mobilităţilor lor.

Electronii eliberaţi de lumină se găsesc, pentru o perioadă de timp foarte scurtă, în zona liberă. În această perioadă ei rătăcesc prin spaţiile interatomice şi, dacă există o diferenţă de potenţial între două puncte ale semiconductorului, se deplasează de preferinţă într-o singură direcţie, dînd naştere în felul acesta unui curent electric. După aceea, fotoelectronii „cad“ din nou, adică trec iarăşi la nivelurile mai joase ale adaosurilor sau chiar în zona ocupată. În cazul unei iluminări neîntrerupte a unui semiconductor apar însă noi şi noi fotoelectroni şi după acelaşi timp o parte oarecare din ei revin

înapoi. Ca rezultat, se stabilește un echilibru dinamic, cînd numărul de fotoelectroni care apar devine egal cu numărul de electroni care se reîntorc înapoi.

Fotoelectronii se găsesc în stare liberă pentru un interval de timp extraordinar de scurt. Dar în acest interval de timp scurt „al duratei de viață" (de la 10^{-3} pînă la 10^{-7}s) electronii care se găsesc în zona liberă sînt echivalenți cu electronii de conducție.

Dezvăluirea naturii efectului fotoelectric interior ne permite să înțelegem că substanțele semiconductoare își măresc considerabil conductibilitatea electrică nu numai sub acțiunea unei radiații. În principiu, orice particulă care ajunge într-un atom și cedează unui electron întreaga ei energie este capabilă să îl aducă în starea liberă. Experiențe nenumărate, repetate de multe ori, au arătat că conductibilitatea apare și în cazul cînd suprafața substanței este bombardată cu electroni rapizi, particule α, protoni, deutroni și alte particule. Firește, pentru apariția conductibilității este necesar să fie respectată condiția: energia particulei care bombardează trebuie să fie mai mare decît energia necesară trecerii electronului în starea liberă.

În semiconductoare, concentrația electronilor de conducție — la temperatura camerei — este considerabil mai mică decît la metale, iar numărul de electroni care apar sub acțiunea luminii este relativ mare, în orice caz el este astfel, încît — pentru o iluminare corespunzătoare — în unele substanțe, cum este de exemplu sulfura de cadmiu (CdS), care poate depăși cu patru ordine de mărime numărul de electroni de conducție în obscuritate. La alte substanțe însă, mai puțin fotosensibile, numărul de fotoelectroni poate atinge 20—30% din numărul total de electroni de conducție chiar în cazul unei iradiații nu prea intense. Firește, această proprietate a unor semiconductoare îi face, chiar numai în această unică privință, materiale foarte importante și extrem de necesare.

9. EFECTUL FOTOVOLTAIC

În 1876, savanții americani Adams și Day au descoperit că la iluminarea unei baghete de seleniu, între capetele ei libere apare o forță electromotoare de valoare mică. Mult timp acest fenomen nu a atras atenția cercetătorilor și chiar a fost uitat. Numai în anul 1924, cu ocazia studiului proprietăților redresoare ale oxidului de cupru, el a fost descoperit

din nou. Pentru a avea o imagine clară despre procesele ce se desfăşoară în acest caz, vom face următoarea experienţă. Luăm o plăcuţă de cupru, care are depus pe una din suprafeţe un strat de oxid de cupru. Oxidul de cupru îl vom acoperi cu un strat foarte subţire de metal, de exemplu cu argint, în aşa fel încît stratul de argint să adere cît se poate de bine la oxidul de cupru. Această acoperire se efectuează cu o instalaţie specială, în care se topeşte argint sau oricare alt metal. Vaporii de metal se depun pe suprafaţa oxidului de cupru, acoperind-o cu un strat de grosimea necesară. Grosimea stratului trebuie să permită trecerea luminii. Se ştie că straturile metalice foarte subţiri sînt semitransparente: printr-o peliculă metalică subţire se pot observa destul de bine obiectele.

După aceea, se alcătuieşte un circuit electric simplu. La electrodul de argint semitransparent conectăm colectorul de la o bornă a unui galvanometru, iar cea de a doua bornă a acestuia din urmă o legăm la cupru (fig. 11). Acest circuit se caracterizează prin faptul că el nu conţine o sursă de curent — o baterie sau un acumulator. Este natural să presupunem că în acest caz acul galvanometrului se va afla mereu în dreptul diviziunii zero. O asemenea ipoteză, dacă am face-o, ar fi însă pripită şi eronată. Este uşor să ne convingem de acest fapt. Să îndreptăm spre electrodul superior de argint semitransparent un flux de lumină. O parte oarecare din lumină va fi reflectată de stratul de argint, altă parte va fi absorbită în interiorul acestui strat şi, în fine, partea care rămîne, trecînd prin argint, va fi absorbită de oxidul de cupru. Privind galvanometrul, vom constata că acul lui s-a deplasat mult spre dreapta faţă de poziţia lui de zero iniţială, adică în circuit a apărut un curent. Este cît se poate de evident că în experienţa noastră apariţia curentului electric este provocată de acea parte din fluxul luminos, care a fost absorbită în stratul de oxid de cupru. Fără a ne ocupa deocamdată de natura acestui fenomen, putem spune imediat că aici are loc o transformare directă a energiei radiante în energia electrică.

Un fenomen analog se observă nu numai la oxidul de cupru, dar şi la o serie întreagă de alte semiconductoare, prelucrate în mod corespunzător.

Studiul consecvent al acestui fenomen a arătat că el apare mai ales la iluminarea unui sistem format dintr-un semiconductor electronic şi unul cu goluri, care vin în contact şi între care există un strat de blocare; despre acesta

din urmă s-a vorbit amănunțit în § 6. Stratul de blocare joacă aici unul dintre rolurile principale, asigurînd transformarea directă a energiei radiante în energia electrică.

Fenomenul apariției forței electromotoare sau a unui curent electric sub acțiunea luminii, în sisteme compuse dintr-un semiconductor electronic și unul cu goluri, un strat de blocare și electrozi metalici, a căpătat denumirea de efect fotoelectric al stratului de blocare sau efect fotovoltaic.

Dacă se respectă anumite condiții, despre care se va vorbi în amănunt în partea a doua a cărții, în limita de separație dintre semiconductorul cu goluri și cel electronic apare o așa-numită joncțiune *p-n*, adică o regiune în care se localizează stratul de blocare. În această regiune se și desfășoară procesele fizice principale, răspunzătoare de apariția efectului fotovoltaic. Mecanismul acestor procese se compune din mai multe etape. Să le examinăm mai cu atenție.

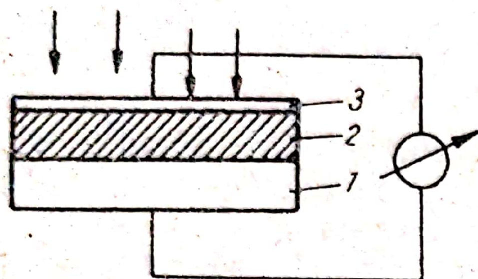


Fig. 11. Plăcuță de cupru cu oxid cupros, conectată în circuitul unui galvanometru:
1 — plăcuță de cupru, 2 — strat de Cu_2O, 3 — electrod metalic semitransparent

Să punem în contact două plăcuțe, una dintr-un semiconductor electronic, iar cealaltă dintr-un semiconductor cu goluri. De ambele părți ale limitei lor de separație se va localiza stratul de blocare. Să ne imaginăm că pe suprafața uneia dintre plăcuțe cade un flux de lumină, care este absorbită parțial de plăcuță. Lumina absorbită eliberează simultan, în semiconductor, electroni și goluri, formînd așa-numitele perechi „electron-gol". Eliberarea perechilor se reduce la faptul că electronii din zona ocupată sînt expulzați în zona liberă, devenind în felul acesta electroni de conducție, iar golurile rămîn în zona ocupată și capătă de asemenea posibilitatea de a participa la conductibilitatea electrică.

Dacă lumina ar fi absorbită de un singur semiconductor oarecare, care nu este în contact cu alt semiconductor, perechile care apar sub influența luminii ar mări numai conductibilitatea semiconductorului respectiv și cu aceasta toate s-ar sfîrși. Cu totul altceva se întîmplă în sistemul considerat de noi, format din semiconductoare cu conductibilitate electronică (notați cu litera *n*) și semiconductoare cu conductibilitate prin goluri (notați cu litera *p*). Contactul între semiconductoare *n* și *p* duce la formarea între ele a unui cîmp electric de con-

tact. Dacă lucrul de ieşire al semiconductorului cu goluri este mai mare decît lucrul de ieşire al celui electronic, ceea ce este obligatoriu pentru două semiconductoare de aceeaşi compoziţie chimică, acest cîmp electric de contact este dirijat de la semiconductorul electronic spre cel cu goluri. Ce se întîmplă în acest caz cu perechile? Evident, purtătorii de curent neprincipali (în minoritate) „eliberaţi" de lumină, adică electronii din semiconductorul cu goluri sau golurile din semiconductorul electronic, se deplasează liber în toate direcţiile. La apropierea de joncţiune *p—n*, sub acţiunea cîmpului de contact, ei vor trece însă prin stratul de blocare, dintr-un semiconductor în celălalt. Pe măsură ce purtătorii de curent în minoritate trec dintr-un semiconductor în altul, acumularea lor într-o parte a sistemului considerat se va accentua, în timp ce în cealaltă parte va avea loc acumularea purtătorilor de curent în majoritate. Prin urmare, perechile formate sub acţiunea luminii vor începe să se separe; electronii se vor concentra în semiconductorul electronic, iar golurile — în semiconductorul cu goluri. Această acumulare nu poate continua la infinit, deoarece în paralel cu creşterea concentraţiei golurilor în semiconductorul cu goluri şi a electronilor în cel electronic, creşte cîmpul electric creat de ele, care împiedică trecerea purtătorilor în minoritate dintr-un semiconductor, prin stratul de blocare, în celălalt semiconductor. Totuşi, pe măsură ce intensitatea acestui cîmp creşte, se măreşte şi fluxul invers de fotopurtători în minoritate. Pînă la urmă se stabileşte un echilibru dinamic, cînd numărul de purtători în minoritate, care se deplasează în unitatea de timp prin stratul de blocare devine egal cu numărul de purtători identici, care se deplasează în acelaşi interval de timp în sens invers. In acest caz, între electrodul superior şi cel inferior se va stabili o diferenţă de potenţial finală oarecare, aceasta reprezentînd — în esenţă — tocmai forţa fotoelectromotoare.

Dacă electrozii sînt conectaţi între ei prin conductoare, formîndu-se un circuit închis, prin acesta va trece curent electric în tot timpul cît sistemul de semiconductoare este supus acţiunii luminii.

10. TERMOELECTRICITATEA

In 1821 a fost descoperit un fenomen fizic foarte interesant, ale cărui posibilităţi tehnice au fost apreciate la justa lor valoare numai în timpurile noastre. Esenţa acestui feno-

men poate fi înţeleasă uşor din următoarea experienţă. Să alcătuim un circuit electric închis, format din trei conductoare metalice şi un aparat electric de măsurat. Drept conductor metalic vom lua două bucăţi de sîrmă de cupru şi o bucată de sîrmă de fier. Să legăm în serie aceste bucăţi de sîrmă şi aparatul de măsurat, aşa cum se arată în fig. 12. Se înţelege uşor că într-un asemenea circuit unde nu există nici un fel de sursă de curent, acul aparatului de măsurat va sta la zero. Dacă vom începe apoi să încălzim punctul de contact dintre cupru şi fier, iar celălalt punct de contact îl vom menţine la o temperatură mai joasă, acul aparatului va devia din poziţia lui de zero: prin circuit va trece un curent, care va circula atîta timp cît între contacte va exista o diferenţă de temperatură. Acest fenomen, denumit în ştiinţă efect termoelectric, se observă nu numai în cazul unor conductoare de cupru şi fier, ci pentru orice combinaţii de metale şi de alte substanţe conductoare de electricitate. Aici este important numai faptul că conductoarele sînt diferite şi că între lipiturile unui conducător cu celălalt s-a menţinut o diferenţă de temperatură.

În cazul considerat de noi circuitul electric a fost închis, dar el poate fi şi deschis. Printr-un circuit deschis curentul nu va circula, dar între punctele extreme ale circuitului — dacă între lipituri există o diferenţă de temperatură — va apărea o oarecare diferenţă de potenţial, numită forţă electromotoare.

Fizicienii care au studiat fenomenele termoelectrice au stabilit că cu cît diferenţa de temperatură dintre lipituri este mai mare, cu atît valoarea E a forţei termoelectromotoare este mai mare şi, în consecinţă, cu atît este mai mare şi intensitatea curentului termoelectric. Dacă temperatura unei lipituri este T_1, iar a celeilalte T_2, mărimea E va fi proporţională cu diferenţa acestor temperaturi: $E = \alpha (T_2 - T_1)$, unde α este aşa-numitul coeficient de forţă termoelectromotoare, egal numeric cu acea forţă electromotoare care ar apărea în sistemul de conductoare considerat, dacă între lipituri ar exista o diferenţă de temperaturi de un grad. Valoarea forţei electromotoare însăşi, la rîndul ei, depinde în mare măsură de natura conductoarelor din care este alcătuit circuitul termoelectric. Astfel, de exemplu, un circuit constituit din sîrme de platină şi bismut generează, pentru aceeaşi diferenţă de temperatură, o forţă termoelectromotoare mult mai mare decît un circuit format, să zicem, din sîrme de aluminiu şi cupru. In conse-

cință, pentru obținerea unor forțe electromotoare cît mai mari posibil este necesar să se aleagă un „cuplu" corespunzător, adică o combinație din două metale diferite. Cuplurile metalice au fost încă de mult studiate și se știe care dintre ele dau rezultate mai bune și care dau rezultate mai slabe. Dacă se conectează în serie mai multe asemenea cupluri, de exemplu 10, și toate lipiturile „fierbinți" sînt menținute la o temperatură mai înaltă, iar toate lipiturile „reci" la o temperatură mai scăzută, forța termoelectromotoare totală a unei asemenea termobaterii va fi de 10 ori mai mare decît aceea a unui singur cuplu.

La studiul fenomenului descris, oricît de superficial ar fi el, este evident faptul că aici are loc o transformare directă a energiei termice în energie electrică, fără nici un fel de stadii intermediare. In adevăr, încălzim lipiturile, adică le aplicăm energia termică și ca rezultat obținem curent electric. Ne putem imagina ușor ce perspective atrăgătoare oferă acest fenomen fizic extrem de interesant. Energia electrică produsă pe cale industrială necesită operații complicate, folosirea unor mașini scumpe care pretind o supraveghere continuă, repararea periodică și înlocuirea pieselor uzate. Scopul acestor mașini este de a transforma energia mecanică în energie electrică. La rîndul ei, această energie mecanică apare în multe cazuri pe seama absorbirii de energie termică. Știința și gîndirea tehnică ar obține o mare victorie dacă s-ar rezolva problema transformării directe a energiei termice în energie electrică, fără a fi nevoie de participarea unor mașini care posedă un număr mare de piese, de părți mobile și sînt de construcție complicată. Dacă am putea genera energie electrică fără intermediul unor mașini complicate, numai simpla aplicare a căldurii la lipituri termoelectrice, aceasta ar însemna o adevărată cotitură în știință. Pînă în prezent, această cotitură nu a avut încă loc și energia electrică se obține — ca și pînă acuma — tot prin procedeele vechi. Această se datorește faptului că în termocuplurile metalice numai o parte neînsemnată din energia termică aplicată lipiturii este transformată în energie electrică și, din această cauză, randamentul unui asemenea dispozitiv este extrem de mic, sub 1%. Situația a început să se schimbe numai după ce academicianul A. F. Ioffe a început să studieze semiconductoarele, care sînt remarcabile prin faptul că forța termoelectromotoare ce apare la multe dintre ele este de cîteva ori mai mare decît aceea obținută cu metale în aceleași condiții.

Să încercăm să elucidăm natura apariţiei forţelor electromotoare. Pentru a simplifica lucrurile, vom considera numai o singură sîrmă, confecţionată dintr-o substanţă semiconductoare oarecare, cu conducţie electronică. Un capăt al sîrmei îl vom încălzi, iar celălalt îl vom răci. În aceste împrejurări, electronii de conducţie vor începe să se deplaseze de la capătul mai cald al sîrmei, unde atît concentraţia lor cît şi energiile lor cinetice au valori mai mari, spre regiunea cu temperatură scăzută, unde concentraţia şi energiile lor cinetice sînt mai reduse. Pe de altă parte, are loc o deplasare a electronilor şi în sens contrar, de la capătul rece spre cel cald. Pînă la un anumit moment, numărul de electroni care se mişcă de la capătul cald spre cel rece este mai mare decît cel în sens invers. Această deplasare a electronilor face ca la capătul cald al sîrmei să apară un surplus de sarcini pozitive, iar la cel rece — un surplus de sarcini negative. Apariţia unor sarcini pozitive şi negative la capetele opuse ale sîrmei, este însoţită de stabilirea în interiorul semiconductoarelor, a unui cîmp electric, dirijat de la capătul cald spre cel rece. Chiar de la începutul procesului studiat, electronii se deplasează în număr mai mare de la capătul cald spre cel rece, decît în sens invers şi prin aceasta măresc acumularea de sarcini spaţiale pozitive şi negative în regiunile opuse ale sîrmei. Acest fapt important face ca intensitatea cîmpului electric, la rîndul ei, să crească şi ea simultan cu mărirea cantităţii de electricitate pozitivă şi negativă la capetele sîrmei. De aceea, cu toate că diferenţa de temperatură este menţinută neîntrerupt, acumularea sarcinilor la capătul cald şi cel rece ale sîrmei va înceta pînă la urmă. Aceasta se întîmplă deoarece intensitatea cîmpului electric creşte atît de mult, încît nu mai este posibilă deplasarea preferenţială a electronilor de la capătul cald spre cel rece. Intervine aici echilibrul termic, cînd fluxurile de electroni dintr-un sens şi din celălalt se egalizează. Ca rezultat al tuturor acestor procese, între punctele extreme ale sîrmei — pentru o diferenţă de temperatură dată — se stabileşte o diferenţă de potenţial constantă care va constitui tocmai forţa termoelectromotoare a semiconductorului respectiv.

În exemplul studiat de noi a figurat o sîrmă făcută din semiconductor cu o conducţie electronică. Ce se va întîmpla însă într-o sîrmă confecţionată dintr-un semiconductor cu goluri? Lucrurile vor fi absolut identice, numai cu deosebirea că în acest caz nu se vor deplasa electronii ci golurile. De

aceea, capătul cald al unui semiconductor cu goluri se va încărca întotdeauna negativ, iar cel rece, pozitiv. Într-un semiconductor electronic, după cum am văzut, s-a observat o situaţie inversă: capătul cald se încarcă pozitiv, iar cel rece negativ.

Dacă se alcătuieşte un circuit din două semiconductoare, unul electronic iar celălalt cu goluri, şi se închide acest cir-

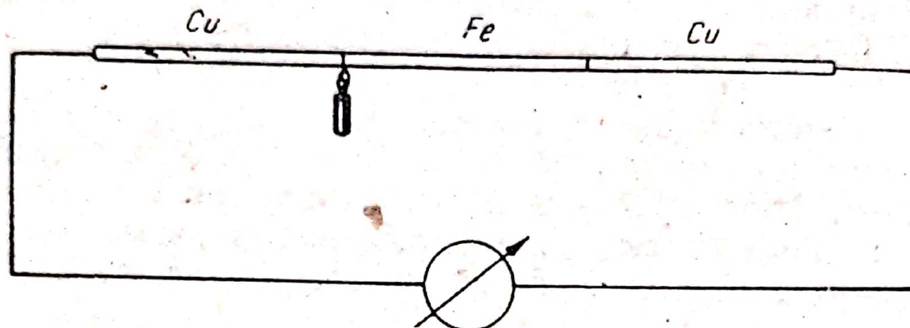


Fig. 12. Circuit termoelectric

cuit printr-un receptor oarecare de energie electrică, iar după aceea se creează între lipituri o diferenţă de temperatură, în circuit apare un curent termoelectric.

În acest caz, după cum se poate uşor înţelege, curenţii termoelectrici care se ivesc separat în fiecare ramură se adună, formînd curentul „cuplului".

Se poate răspunde acuma la întrebarea: care sînt avantajele principale ale semiconductoarelor în comparaţie cu metalele? Mecanismul apariţiei forţei electromotoare la metale este identic cu acela din cazul semiconductoarelor. La metale, într-un interval larg de temperaturi, concentraţia electronilor liberi rămîne însă practic constantă şi, ceea ce este mai important, energia lor cinetică depinde în mică măsură de temperatură. De aceea, creînd la capetele metalului o diferenţă de temperatură, deşi obţinem condiţiile pentru deplasarea preferenţială a electronilor de la capătul cald spre cel rece, această deplasare este atît de neînsemnată, încît diferenţa de potenţial rezultantă este extrem de mică.

În semiconductoare însă, energia cinetică a electronilor sau a golurilor, precum şi concentraţia lor, depind considerabil de temperatură, ceea ce duce la valori mari ale forţelor termoelectromotoare.

Se poate arăta că randamentul transformării energiei termice în energie electrică, cu ajutorul termocuplurilor, este cu atît mai mare, cu cît valoarea conductivităţii δ şi a coeficien-

tului α este mai mare şi cu atît mai mic, cu cît coeficientul de conductibilitate termică $\varkappa$ este mai mare. Combinarea acestor trei mărimi în semiconductoare are o valoare mai mare decît la metale. Conductivitatea electrică a metalelor este considerabil mai mare decît conductivitatea semiconductoarelor, dar în schimb la semiconductoare valoarea lui α depăşeşte de zeci şi chiar sute de ori valoarea lui α pentru metale. În plus, conductibilitatea termică a semiconductoarelor este de cîteva ori mai mică decît aceea a metalelor. Toate acestea luate împreună duc la valori relativ mari ale randamentului termocuplurilor confecţionate din semiconductoare, care în prezent ajung pînă la aproape 8%. Proprietăţile termoelectrice bune ale semiconductoarelor au permis să se progreseze mult în rezolvarea problemei importante a transformării energiei termice direct în energie electrică.

11. EFECTUL PELTIER

În 1834, naturalistul francez Jean Charles Anastase Peltier a descoperit un nou fenomen fizic. Sensul acestui fenomen poate fi înţeles uşor examinînd un circuit electric alcătuit din trei conductoare *ABA* şi o sursă de tensiune continuă (fig. 13). După cum se arată în fig. 13, conductoarele *AA*, confecţionate din unul şi acelaşi material, formează ramurile extreme ale circuitului, iar conductorul *B*, făcut din alt material, constituie porţiunea din mijloc a acestuia. Curentul electric continuu care trece prin circuit provoacă apariţia în acesta a mai multor fenomene termice. Unul dintre ele este degajarea de căldură în conductoare, prin efect Joule-Lenz. Alt fenomen, descoperit de Peltier, constă în faptul că în locul de contact dintre conductorul *A* şi conductorul *B*, pe lîngă cantitatea de energie disipată prin efect Joule-Lenz, se degajează o cantitate oarecare de energie termică *Q*, iar în locul de contact al conductorului *B* cu conductorul *A* se absoarbe o cantitate de energie egală. Ca rezultat, în regiunile de contact ale conductoarelor se stabilesc temperaturile T_1 şi T_2, iar $T_1 > T_2$. Fizicianul E. H. Lenz din Petersburg, care s-a interesat de acest fenomen, a început să-l studieze amănunţit. Făcînd să treacă un curent electric printr-un sistem format din conductoare metalice de natură diferită, el a reuşit să micşoreze atît de mult temperatura unei lipituri, încît o picătură de apă care se găsea pe lipitură a îngheţat.

Cercetările ulterioare au dus la descoperirea a numeroase relaţii cantitative importante. După cum s-a reuşit să se stabilească, cantitatea de căldură Q degajată la o lipitură sau, invers, în cazul sensului opus al curentului — absorbită de lipitură, este proporţională cu intensitatea I a curentului şi cu timpul t cît durează curgerea acestuia

$$Q = PIT,$$

unde P este coeficientul lui Peltier, numeric egal cu acea cantitate de energie termică ce se degajă sau este absorbită în lipitură atunci cînd prin aceasta trece o cantitate de electricitate egală cu unitatea. Analizînd efectul Peltier şi folosind în acest scop relaţiile termodinamice, fizicianul William Thomson a stabilit, în 1857, că între coeficientul α de forţă termoelectromotoare şi coeficientul P există următoarea relaţie:

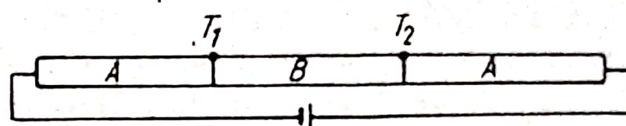


Fig. 13. Circuit care ilustrează efectul Peltier

$$P = \alpha T,$$

unde T este temperatura absolută.

Toate fenomenele termoelectrice, inclusiv efectul Peltier, se desfăşoară deosebit de pregnant în sistemele alcătuite din semiconductoare electronice şi cu goluri. In adevăr, între coeficientul P şi coeficientul α de forţă termoelectromotoare există o interdependenţă: aceste mărimi sînt proporţionale una cu alta. De aceea, un circuit termoelectric eficace trebuie să fie format nu din ramuri metalice, ci semiconductoare şi anume în aşa fel, încît o ramură să fie confecţionată dintr-un semiconductor cu conducţie electronică pronunţată, iar celălalt, cu conducţie prin goluri. Care este explicaţia fenomenului Peltier?

Vom încerca să răspundem la această întrebare considerînd la început un circuit termoelectric alcătuit din semiconductoare eterogene care posedă un singur tip oarecare de conducţie, să zicem electronică. Factorul principal, care joacă un rol preponderent în procesul considerat, constă în faptul că în diferitele substanţe din care sînt confecţionate ramurile circuitului termoelectric, purtătorii de electricitate (electroni sau goluri) posedă energie diferită. De aceea, cînd sensul curentului electric este astfel, încît electronii care posedă o

energie mai mare trec în semiconductorul în care energia electronilor este mai mică, primii electroni — la trecerea, prin regiunea de contact, la celălalt conductor — își cedează energia suplimentară atomilor care formează acest semiconductor, ceea ce duce la o degajare de căldură în punctul de contact. Invers, cînd curentul circulă în așa fel, încît electronii care posedă energie mai mică trec prin punctul de contact în celălalt semiconductor, în care energia electronilor este mai mare, electronii ce s-au deplasat își măresc energia pe seama energiei atomilor acestui ultim semiconductor și în regiunea de contact are loc o absorbție de căldură.

Vorbind cu cuvintele academicianului A. P. Ioffe, „fluxul de electricitate care circulă prin termocupluri este însoțit de un flux de căldură de la un capăt la altul. În acest caz, capătul de la care se ia căldură se va răci, iar celălalt — spre care se îndreaptă căldura — se va încălzi". În aceste raționamente au figurat semiconductoare cu conducție de tip electronic. Lucrurile se întîmplă exact la fel și atunci cînd circuitul este alcătuit din termocupluri semiconductoare cu mecanism de conducție prin goluri. Totuși, așa cum s-a arătat mai sus, fenomenele termoelectrice se desfășoară deosebit de eficace în circuitele formate din semiconductoare electronice și cu goluri. Să examinăm un circuit de acest fel. Vom admite că el este alcătuit dintr-o bară semiconductoare care posedă conducție prn goluri, o a doua bară semiconductoare, făcută din substanță cu conducție electronică, și dintr-o sursă de tensiune continuă, de exemplu o baterie de acumulatoare. Să presupunem, așa cum se arată în fig. 14, că sensul curentului este de la stînga spre dreapta. În acest caz, golurile din semiconductorul cu goluri și electronii din cel electronic se vor deplasa unii în întîmpinarea altora. La punctul de contact va avea loc recombinarea lor. Mecanismul acestei recombinări este următorul: un electron, care anterior „se găsea" în zona liberă a semiconductorului electronic, ajungînd în semiconductorul cu goluri, „trece" imediat în zona ocupată, în locul unui gol. În acest caz, întreaga lor energie anterioară se transformă în căldură, care se și degajează în regiunea de contact. Cu totul altfel stau lucrurile atunci cînd sensul curentului este astfel, încît golurile și electronii se vor deplasa în sensuri opuse (fig. 15). În acest caz, electronii care se găseau în zona ocupată a semiconductorului cu goluri, „sînt împinși" în zona liberă a celui electronic. Ca urmare, electronul și golul care apar simultan se vor deplasa, sub acțiunea

cîmpului electric exterior, în sensuri opuse. Pentru formarea unei perechi „electron-gol“ se absoarbe o cantitate oarecare de energie luată din rezervele de căldură ale contactului, ceea ce duce la scăderea temperaturii acestuia. Din studiul mecanismului efectului Peltier se poate deduce uşor o regulă mnemotehnică ce permite să se stabilească fără greşală la ce

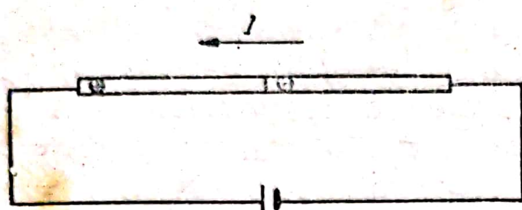


Fig. 14. In cazul unui asemenea sens al curentului, golurile şi electronii se vor deplasa unii în întîmpinarea celorlalţi spre locul de contact

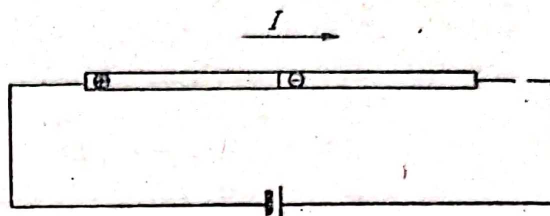


Fig. 15. In cazul acestui sens al curentului, golurile şi electronii se vor mişca în sensuri opuse

punct de contact va avea loc o degajare sau, dimpotrivă, o absorbţie de energie termică. Dacă curentul electric este dirijat de la semiconductorul cu goluri spre cel electronic, în punctul de contact se degajează energie termică. Cînd curentul este îndreptat de la semiconductorul electronic spre cel cu goluri, în regiunea de contact se absoarbe energie termică. La fel ca şi termoelectricitatea, care mai înainte nu juca nici un rol în energetică, efectul Peltier a fost mult timp considerat mai curînd un fel de curiozitate, decît ca un fenomen important din natură, capabil de a aduce foloase practice. Apreciind posibilităţile termocuplurilor din semiconductoare, academicianul A. F. Ioffe a emis în 1949 ideea de a se folosi efectul Peltier pentru crearea unor instalaţii de răcire. Curînd a elaborat el însuşi o teorie amănunţită a instalaţiilor de răcire termoelectrice, care a fost inclusă în cartea de tematică mai largă „Bazele energetice ale bateriilor termoelectrice din semiconductoare“, care a văzut lumina tiparului în 1950. Din acest moment, fizicienii Institutului de semiconductoare al Academiei de ştiinţe a U.R.S.S. şi-au concentrat eforturile spre rezolvarea problemei obţinerii frigului pe cale termoelectrică. Ca rezultat al acestor eforturi au apărut primele modele de laborator de instalaţii de răcire, care au trecut cu succes prin încercările de exploatare. Acestea din urmă au arătat că, în comparaţie cu metodele existente, procedeul de răcire pe cale termoelectrică posedă o serie întreagă de avantaje nepreţuite. Mai mult încă, s-a dovedit că în nume-

roase cazuri, numai cu ajutorul bateriilor de răcire cu semiconductoare se pot soluţiona problemele care nu pot fi rezolvate uşor şi simplu prin metodele precedente.

12. LUMINESCENŢA

Unele materiale semiconducătoare posedă proprietatea de a deveni luminescente, adică de a emite lumină, fără a fi încălzite pînă la temperaturile înalte la care apare — la substanţele obişnuite — lumina de temperatură. Spre deosebire de lumina de temperatură, orice emisiune de lumină, care nu necesită temperaturi înalte, se numeşte luminescenţă. Acest termen provine de la cuvîntul latin lumen, care înseamnă lumină.

În prezent, se cunoaşte un număr destul de considerabil de substanţe semiconductoare capabile de a deveni luminescente, iar fizicienii reuşesc astăzi să le producă pe cale artificială. Luminescenţa a devenit obiectul unor cercetări ştiinţifice profunde şi serioase. Studiului ei şi-au dăruit timpul oameni de ştiinţă ca Petrov, Becquerel, Stokes, Vavilov şi alţii.

Există mai multe tipuri de luminescenţă; vom enumera cîteva dintre ele.

Unele substanţe, de exemplu marmora, amestecurile de anumite săruri, diamantul, pot radia o lumină slabă în cazul unei încălziri neînsemnate. Există şi compuşi chimici care luminează dacă li se micşorează puternic temperatura, ajungîndu-se pînă la minus 180°C, adică la temperatura la care aerul se găseşte în stare lichidă. Acest tip de luminescenţă se numeşte termoluminescenţă.

Gazele rarefiate care se găsesc în aşa-numitele tuburi cu descărcări în gaze, emit o lumină strălucitoare atunci cînd prin ele circulă un curent electric. În funcţie de natura gazului, lumina poate avea diferite culori: roşie, albastră, violetă, galbenă etc.

Lumina emisă de un gaz, care apare la trecerea unui curent electric prin acesta, se numeşte electroluminescenţă.

În cursul desfăşurării anumitor reacţii chimice, substanţele care participă la aceste reacţii emit lumină. Acest fenomen se numeşte luminescenţă de natură chimică.

Din această categorie face parte luminescenţa fosforului galben, care se oxidează lent în prezenţa aerului. De regulă,

combinarea acestui element cu oxigenul este însoţită de o emisiune de lumină destul de intensă.

În natură există şi alte substanţe care, intrînd în reacţie de combinaţie cu oxigenul, radiază în acest caz o lumină strălucitoare de cele mai diferite nuanţe. Multe insecte posedă această proprietate; luminescenţa lor este provocată de procese chimice. Dintre aceste insecte, cele mai cunoscute sînt „licuricii".

Cunoscutul călător şi cercetător al regiunii Ussuri, V. K. Arseniev, un profund cunoscător al naturii, povestea astfel despre licuricii care vieţuiesc în taiga:

„Noaptea era liniştită, tocmai aşa cum le place insectelor nocturne. Ceea ce am văzut m-a uimit atît de mult, încît am uitat cu desăvîrşire de musculiţe şi priveam ca fermecat. Întregul văzduh era plin de scîntei albăstrui licăritoare. Erau licuricii. Lumina trimisă de ei era tremurătoare şi nu apărea niciodată mai des decît la o secundă. Urmărind o asemenea scînteie, se putea urmări zborul fiecărei insecte în parte. Licuricii aceştia nu apar dintr-odată, ci treptat, cîte unul. Se spune că popoarele migratoare din Rusia, văzînd pentru prima dată această lumină licăritoare, au tras în ea cu arcurile şi au fugit înspăimîntaţi. Acuma nu erau insecte izolate ci mii şi milioane. Ele zburau în iarbă, jos deasupra pămîntului, se furişau printre arbuşti, se ridicau sus deasupra pomilor. Luminau insectele, licăreau şi stelele. Era un adevărat joc de lumini".

În afară de insectele luminoase, există şi unele varietăţi de peşti marini şi alte vietăţi din mări şi oceane, capabile de a emite lumină. Luminează de asemenea şi unele tipuri de bacterii care trăiesc în mare.

Proprietatea de a emite lumină apare şi la unele feluri de ciuperci şi bucăţi de lemn putred, numite în mod obişnuit putregaiuri.

Toate aceste cazuri se încadrează în categoria luminescenţei chimice.

Dacă în întuneric deplin se rupe o bucată de zahăr, pentru scurt timp ea luminează slab. O serie întreagă de substanţe, în special cele de structură cristalină, luminează dacă sînt deformate: dacă sînt rupte, comprimate, turtite etc.

Acest tip de emisiune de lumină se numeşte triboluminescenţă. Denumirea provine de la cuvîntul grecesc tribo, care înseamnă „eu frec".

Nu este lipsit de interes, din punct de vedere fizic, fenomenul fluorescenței, care a căpătat această denumire de la mineralul fluorit. El constă în faptul că unele substanțe încep să emită o lumină slabă, după ce au fost iradiate cu lumină. Această proprietate o posedă: feldspatul (fluoritul), soluția de sulfat de chinină în apă, platinocianura de bariu, minereul de zinc, așa-numita sticlă de uraniu și alți compuși chimici.

Prezintă un efect fluorescent observabil și unele lichide, de exemplu petrolul, unele sorturi de uleiuri și alte substanțe.

În fine, există încă un tip de luminescență care a căpătat denumirea de fosforescență. Acest termen este și el de origine grecească: cuvîntul fos înseamnă lumină.

Unii compuși ai metalelor din familia alcalino-pămîntoasă (calciul, stronțiul, bariul) cu sulful sau seleniul și cu adaosuri mici de metale grele, de exemplu cupru, argint, plumb, stibiu, bismut și altele, fiind topite împreună cu unele săruri, capătă noi proprietăți și anume: dacă în prealabil, în decursul unui interval de timp oarecare, ele sînt luminate cu raze vizibile sau în special ultraviolete, iar apoi se întrerupe iluminarea, ele încep să lumineze singure destul de strălucitor. Compușii semiconductori de acest fel au căpătat denumirea de fosfori. Nu trebuie să se confunde aici elementul fosfor, care — trebuie să spunem — este capabil de a emite lumină fără nici un fel de participare a luminii exterioare, cu o substanță chimică complexă, care are aceeași denumire, însă este pronunțată altfel (accentul cade pe ultima vocală, o).

Prin urmare, fosfòrii sau, cum mai sînt numiți altfel, luminoforii, sub acțiunea razelor care cad asupra lor, capătă o nouă proprietate: capacitatea de a emite lumină în decursul unei perioade de timp mai mult sau mai puțin îndelungate. Timpul de luminescență proprie al luminoforului este diferit la diversele substanțe; el poate dura de la fracțiuni de secundă pînă la cîteva luni.

Fosforescența poate apărea dacă asupra luminoforului se dirijează un flux de lumină, de raze ultraviolete și Roentgen, sau acesta este supus unui bombardament electronic.

Dacă un fascicul de electroni este îndreptat spre un ecran acoperit cu o substanță fosforescentă sau fluorescentă, el va începe să lumineze intens.

Această proprietate, după cum se va vedea mai tîrziu, este folosită în aparate foarte importante, în particular la microscoapele electronice, oscilografele catodice, tuburile videoreproductoare (tuburi kinescop) și în aparatele pentru văzut

pe întuneric. Atît fosforescența cît și fluorescența reprezintă cazuri particulare ale luminescenței, care au căpătat denumirea de fotoluminescență.

Dar ce se întîmplă cu materia în timpul fosforescenței sau fluorescenței ?

Să încercăm să lămurim latura fizică a problemei. Lumina emisă de orice sursă este de fapt rezultatul luminii emise de diferiți atomi sau molecule care alcătuiesc substanța sursei de lumină. Acțiunea luminoasă totală a întregii cantități de atomi capabili de a emite lumină constituie tocmai acel flux de lumină pe care îl percepem privind spre sursa de lumină. La orice emisiune de lumină, atomii corpului care luminează pierd energie. De aceea, pentru a obliga un corp oarecare să emită lumină fără a i se modifica compoziția chimică, este necesar să i se furnizeze o oarecare cantitate de energie din afară și numai atunci corpul va putea să înceapă să lumineze. Această energie poate fi furnizată și sub forma unui flux de fotoni.

Lumina, fiind absorbită de materie, se poate transforma integral în căldură. Uneori, lumina absorbită de un corp contribuie la desfășurarea unor reacții chimice. În unele cazuri, razele luminoase creează un curent electric care circulă pe fire ; aici energia luminoasă este transformată în energie electrică.

În general, energia luminoasă se poate transforma — în anumite condiții — în orice alte feluri de energie.

Dar atunci apare următoarea întrebare : lumina, ajungînd la o substanță și fiind absorbită de ea, nu poate oare să se transforme într-o altă formă de energie, iar apoi să se transforme din nou în energie luminoasă ? Firește, acest lucru este posibil.

Cînd lumina cade pe suprafața unei substanțe fotoluminescente și este absorbită de aceasta, înseamnă de fapt că atomii izolați ai substanței absorb părți mici de energie luminoasă, mărindu-și posibilitățile energetice, adică rezervele lor de energie potențială. În acest caz, toți atomii care au absorbit lumină trec din starea normală într-o stare „excitată“, care se caracterizează prin faptul că atomul excitat devine capabil de a emite radiații. În consecință, de îndată ce o substanță fluorescentă începe să fie supusă acțiunii luminii, atomii ei trec din starea normală într-o stare excitată. Intrucît starea excitată corespunde unui echilibru instabil, iar atomii nu se pot găsi întotdeauna — pentru un timp înde-

lungat — în această stare, ei înşişi încep să emită lumină simultan cu începerea iluminării. Se înţelege că din punctul de vedere al mecanismului procesului, între fluorescenţă şi fosforescenţă nu există o diferenţă de principiu. Şi într-un caz şi în celălalt are loc o acumulare, o înmagazinare de energie luminoasă care cade pe substanţă şi care nu se va transforma în alt fel de energie. După încărcarea corespunzătoare cu „lumină", substanţa fosforescentă — absorbind o cantitate oarecare de energie luminoasă — a căpătat prin aceasta capacitatea de a ceda înapoi această energie în decursul unui interval de timp mai lung sau mai scurt, nu sub formă de căldură, electricitate sau sunet, ci numai sub formă de lumină. Iată de ce unii compuşi semiconductori naturali sau creaţi artificial sînt capabili să devină fluorescenţi sau fosforescenţi.

Evident, orice substanţă luminescentă, supusă acţiunii luminii, se compune din atomi excitaţi şi atomi normali. Fireşte, numărul acestora din urmă este mai mare, deoarece lumina absorbită nu pătrunde în întreaga grosime a substanţei. În plus, absorbind lumina incidentă, şi trecînd din starea normală în cea excitată, atomii — devenind capabili de a emite lumină — încep să profite practic imediat de această proprietate, adică încep să radieze ei înşişi. Este uşor de înţeles că după ce au radiat, aceşti atomi — anterior aflaţi în stare excitată — devin iarăşi normali pînă cînd nu vor absorbi din nou o parte de energie corespunzătoare. Toate aceste procese complicate, natural, au loc în deplină concordanţă cu legea conservării energiei.

Fizicianul englez Stokes, ocupîndu-se de studiul amănunţit al proprietăţilor fotoluminescente ale diverselor substanţe, a descoperit legea care acum îi poartă numele.

În conformitate cu legea lui Stokes, lungimile de undă ale luminii emise de o substanţă fluorescentă sînt mai mari decît lungimile de undă ale luminii incidente. Cu alte cuvinte, acest fapt este echivalent cu a spune că dacă o substanţă capabilă de a deveni fluorescentă este iluminată cu lumină verde, ea va emite în acest caz raze galbene, sau portocalii, sau roşii — în general orice fel de raze, numai lungimea lor de undă să fie mai mare decît lungimea de undă a luminii verzi primare, care a provocat luminescenţa.

Legea lui Stokes nu are aproape de loc excepţii şi este valabilă pentru majoritatea substanţelor. Ea este, în esenţă, unul dintre cazurile particulare ale unei proprietăţi mai gene-

rale a luminii — natura cuantică a acesteia. Din punctul de vedere al teoriei cuantice a luminii, legea lui Stokes devine cît se poate de lămurită. În adevăr, să presupunem că la suprafața unei substanțe luminescente ajunge un foton cu energia

$$W = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

unde c este viteza luminii. Fotonul este absorbit în întregime de o moleculă. Datorită acestei absorbții molecula devine excitată, adică electronul corespunzător, care face parte din alcătuirea moleculei respective, trece la un nivel de energie mai înalt. După aceea, același electron, rămînînd un timp oarecare în stare excitată, revine din nou la nivelul lui de energie anterior. În acest caz molecula radiază un foton de energie $W_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$. Este absolut evident că, pe baza legii conservării energiei, W_0 nu poate fi mai mare decît W. W_0 poate fi sau egal cu W, sau — în majoritatea cazurilor — este mai mic decît W. De aici rezultă că

$$\frac{hc}{\lambda_0} \leq \frac{hc}{\lambda},$$

de unde se obține

$$\lambda \leq \lambda_0 .$$

Atomul sau molecula, sub acțiunea luminii, trece din starea normală în cea excitată. În această stare atomul se poate găsi sau pentru fracțiuni de secundă neînsemnate, sau — dimpotrivă — pentru un timp extrem de îndelungat. Exterior, aceasta se va manifesta prin durata fotoluminescenței. În primul caz avem de-a face cu o fluorescență, iar în cel de-al doilea — cu o fosforescență.

În rîndul compușilor semiconductori există substanțe cu proprietăți fotoluminiscente foarte pronunțate, care și-au găsit aplicații suficient de numeroase.

13. UNELE GENERALIZĂRI

În paginile precedente s-a făcut încercarea de a ajuta cititorul să înțeleagă proprietățile electrice neobișnuite ale semiconductoarelor. Este util să facem acum unele generalizări și să tragem cîteva concluzii. Prima și cea mai prin-

cipală concluzie este aceea că mecanismul apariţiei conductibilităţii electrice în semiconductoare se deosebeşte din punct de vedere principial, calitativ, de mecanismul apariţiei conductibilităţii electrice la metale. În metale, întotdeauna şi în toate împrejurările, există electroni liberi. Ei nu trebuie să fie obţinuţi printr-un anumit proces fizic. În semiconductoare însă, electronii de conducţie trebuie să fie creaţi sau prin intermediul căldurii, sau al unei radiaţii, sau prin bombardarea cu particule, sau prin orice alt purtător de energie. De aceea, rezistenţa semiconductoarelor depinde în mare măsură de temperatură şi se micşorează odată cu creşterea acesteia.

O a doua deosebire şi, fără îndoială, esenţială, a semiconductoarelor faţă de metale constă în numărul diferit de electroni liberi din unele şi din celelalte. Se ştie că concentraţia electronilor liberi dintr-un metal este foarte mare, în orice caz nu mai mică decît numărul de atomi, adică de ordinul 10^{23} pe 1 cm^3 de metal şi, ceea ce este foarte caracteristic, ea nu depinde practic de loc de nici un fel de condiţii exterioare: temperatură, umiditate, presiune şi alţi factori. În cazul semiconductoarelor pitice, însă, la temperaturile normale, concentraţia purtătorilor de curent — adică a electronilor sau golurilor — este considerabil mai mică şi depinde în mare măsură de temperatură.

Ca o particularitate importantă a multor semiconductoare trebuie considerată mobilitatea mare a purtătorilor de curent, a cărei valoare — în cazuri izolate — ajunge pînă la cîteva zeci de mii. Astfel, de exemplu, mobilitatea electronilor în compusul InSb ajunge pînă la 80 000 $cm^2/V.s$. Mobilitatea electronilor în germaniul *n* este de $\sim$ 4 000 $cm^2/V.s$, iar în siliciul *n* — de 1 200 $cm^2/V.s$, în timp ce mobilitatea electronilor liberi ai unui metal nu depăşeşte cîteva sute.

În aceeaşi măsură este importantă şi o altă proprietate a unor semiconductoare: valoarea mare a „duratei de viaţă" a purtătorilor de curent — electroni sau goluri — care la siliciul pur atinge 200 μs, iar la germaniu — 1 000 μs.

Posibilitatea de a se crea semiconductoare cu proprietăţi electrice stabilite în prealabil, prin introducerea în substanţa semiconductoare a unor adaosuri adecvate, joacă un rol fundamental în practica electronicii semiconductoarelor.

Trebuie să se menţioneze că procesele fizice care se desfăşoară la limita de separaţie a două semiconductoare, cu conducţie prin goluri şi conducţie electronică, care vin în contact

unul cu altul, nu se observă aproape de loc în sistemele metalice.

Toate acestea constituie numai particularitățile principale, fundamentale ale substanțelor semiconductoare. Aceste particularități precum și alte proprietăți ale semiconductoarelor fac ca ele să fie materiale de neînlocuit, din care se realizează aparate remarcabile ce au pătruns literalmente în toate domeniile științei și tehnicii.

CAPITOLUL II

SEMICONDUCTOARELE ÎN ŞTIINŢĂ ŞI TEHNICĂ

1. TERMOREZISTENŢELE

Secolul nostru se caracterizează prin dezvoltarea intensă a automaticii şi pătrunderea metodelor de automatizare în cele mai diferite domenii ale ştiinţei şi tehnicii. Folosirea instalaţiilor automate se dovedeşte, în multe cazuri, excepţional de eficace. Probleme tehnice dintre cele mai importante, anterior greu de rezolvat, capătă soluţii simple şi elegante cu ajutorul diferitelor maşini automate.

Multe instalaţii automate includ, drept unul dintre elementele cele mai importante, o termorezistenţă semiconductoare sau, cum mai este numită uneori, un termistor.

Principiul funcţionării termistoarelor este bazat pe proprietatea semiconductoarelor de a-şi modifica considerabil rezistenţa în cazul variaţiei temperaturii lor. În timp ce coeficientul de temperatură γ al rezistenţei, pentru metalele pure, are valori cuprinse între limitele 0,003—0,004 pe 1°C, la unele semiconductoare valoarea acestui coeficient este de 10—20 ori mai mare şi, de regulă, are semn opus. Variaţia puternică a rezistenţei semiconductoarelor în funcţie de temperatură este tocmai factorul ce a permis să se construiască termorezistenţele sensibile, care, în consecinţă, reprezintă rezistenţe semiconductoare de volum, cu coeficient de temperatură al rezistenţei de valoare mare. Se înţelege de la sine că pentru confecţionarea termistoarelor se pot folosi substanţe semiconductoare cu conducţie atît electronică, cît şi prin goluri.

Construcţia termistorului este cît se poate de simplă. Unei bucăţele de semiconductor i se dă forma de fir, tijă, plăcuţă subţire, bilă, petală rotundă sau oricare altă formă (fig. 16). În corpul semiconductorului se presează doi electrozi de curent, cu ajutorul cărora termistorul se introduce în circuitul unei instalaţii oarecare. Rezistenţa semiconducto-

rului se alege în așa fel, încît ea să fie considerabil mai mare decît rezistența altor elemente de curent ale circuitului. Aceasta se face pentru ca intensitatea curentului care trece prin circuit să fie, în linii mari, determinată de rezistența termistorului, sau la urma urmelor, de temperatura lui, adică o dată cu creșterea temperaturii să se mărească, iar dacă temperatura scade, să se micșoreze.

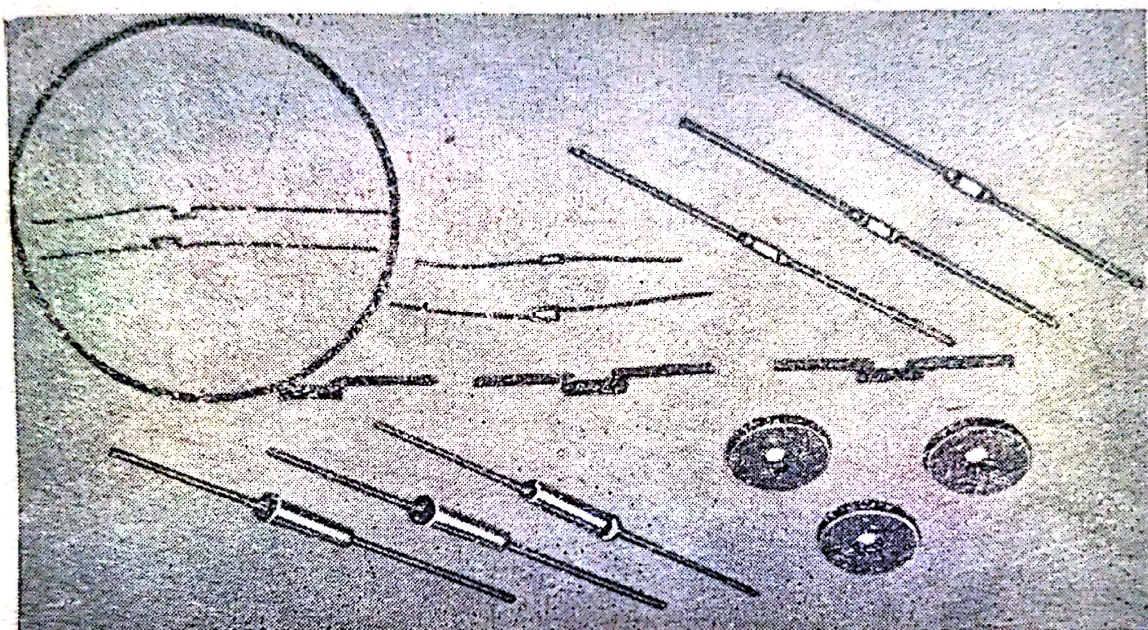


Fig. 16. Aspectul exterior al termorezistențelor

Folosirea acestui principiu este absolut suficientă pentru a se putea alcătui zeci de dispozitive dintre cele mai diferite. Vom da cîteva exemple. Un termistor conectat într-un circuit electric special cu sursă de tensiune și galvanometru (aparat destinat să măsoare curenți de intensitate mică), determină cu mare precizie temperatura mediului. Termistorul este introdus el însuși în mediul a cărui temperatură trebuie să fie măsurată, iar galvanometrul este etalonat direct în grade. O dată cu variația temperaturii se va schimba și intensitatea curentului și acul galvanometrului va devia, indicînd precis numărul de grade.

Folosind termistoare, s-a reușit să se realizeze circuite pentru determinarea la distanță a temperaturii obiectelor care se află la o distanță relativ mare de aparatul de măsurat. Prin intermediul unor asemenea circuite se măsoară temperatura la mari înălțimi, temperatura solului și a apei la dife-

rite adîncimi, a cărbunelui în depozitele de cărbune, a grînelor în silozuri etc.

Uneori, procesul de determinare a temperaturii prezintă complicaţii foarte mari. Cum să se măsoare, de exemplu, temperatura frunzei unei plante sau temperatura sîngelui într-o venă? Este foarte dificil să se introducă un termometru într-un vas sanguin. Un microtermistor de construcţie specială simplifică extrem de mult rezolvarea unor probleme de acest fel. El constituie, în funcţie de aplicaţie, o bilă de semiconductor cu diametrul de la 5 pînă la 50 μ (fig. 17), fixată pe un tub capilar de sticlă, sau poate avea orice alt aspect. O asemenea bilă mică poate fi introdusă chiar şi în interiorul inimii omeneşti sau al oricărui alt organ. Printr-un procedeu asemănător a fost determinată şi temperatura frunzelor multor plante, care se găsesc în cele mai variate condiţii de existenţă şi au fost studiate multilateral procesele lor de schimb de căldură cu mediul exterior, ceea ce reprezintă un mare interes ştiinţific.

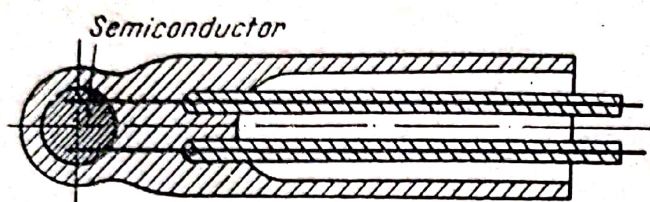


Fig. 17. Construcţia unei microtermorezistenţe realizate de V. G. Karmanov, colaborator ştiinţific al Institutului de agrofizică

În ultimii ani, microtermorezistenţele au început să fie folosite pentru diagnosticarea timpurie a unor maladii greu de identificat ale organelor interne, în special a tumorilor maligne. S-a dovedit că tumorile au o temperatură ceva mai mare decît ţesuturile sănătoase. Se cunosc cazuri cînd microtermorezistenţa a permis să se determine precis configuraţia şi amplasarea unei tumori în creierul omului şi a ajutat chirurgului să intervină cît se poate de sigur şi precis.

Există un număr destul de mare de circuite în care se folosesc termorezistenţe, special destinate să regleze temperatura. Un asemenea circuit, de exemplu, poate fi următorul. Termorezistenţa se găseşte într-un termostat în care trebuie să se menţină o temperatură constantă şi este conectată în circuitul unui releu electromagnetic sensibil. La creşterea temperaturii, releul anclanşează şi întrerupe circuitul bobinajului termostatului. Cînd temperatura va scădea pînă la valoarea prescrisă, releul conectează din nou alimentarea ter-

mostatului. Se înţelege de la sine că aparatul este gradat în prealabil pentru temperaturi necesare fiecărui caz concret.

Pentru pornirea unui motor electric cu excitaţia în paralel este necesar să se mărească treptat intensitatea curentului. În acest scop se foloseşte în mod obişnuit un reostat de pornire, care este scos treptat din circuit pe măsură ce turaţia motorului se măreşte. În ultimii ani, în locul unui reostat de pornire a început să se folosească din ce în ce mai des un termistor conectat în circuitul rotoric al motorului. La aplicarea tensiunii, prin bobinajul motorului, în consecinţă şi prin termistor, începe să circule curentul. În termistor se degajează căldură, temperatura lui se măreşte, iar rezistenţa scade. Scăderea rezistenţei condiţionează creşterea curentului, iar simultan cu aceasta şi mărirea turaţiei motorului, pînă cînd motorul va ajunge în regimul lui de funcţionare obişnuit. Bineînţeles, creşterea curentului nu poate continua la infinit, deoarece intensitatea lui este limitată de rezistenţa circuitului, în care intră — fireşte — şi rezistenţa bobinajului motorului. Întreg acest proces de pornire durează, în funcţie de tipul de rezistenţă, de la 30 pînă la 180 s.

Circuitul de limitare a curentului, pe care tocmai l-am descris, este realizat şi în alte variante, pentru cele mai diverse scopuri. În asemenea circuite termistorul are rolul de releu de timp, care îşi găseşte aplicaţii în multe cazuri. Adesea, termorezistenţa este combinată cu un releu electromagnetic, care constituie mecanismul de execuţie. Un avantaj caracteristic al releului de timp cu termorezistenţă constă în faptul că el poate funcţiona tot aşa de bine atît în curent continuu, cît şi în curent alternativ.

Există destul de multe circuite în care receptoarele de curent sînt legate în serie. În cazul unui asemenea mod de conectare, este suficient ca un receptor să iasă din funcţiune pentru ca funcţionarea celorlalte să fie întreruptă. Pentru a evita acest lucru se folosesc uneori termorezistenţe.

Pentru simplitate, vom examina un circuit format din patru lămpi cu incandescenţă conectate în serie. În paralel cu fiecare lampă se leagă o termorezistenţă de valoare suficient de mare (fig. 18). La trecerea curentului prin circuit, prin fiecare termorezistenţă va circula un curent neglijabil, deoarece rezistenţa lămpii este considerabil mai mică decît rezistenţa termistorului. Cînd prin termistor circulă un curent de valoare mică, în el se va degaja o cantitate neînsemnată de căldură, care este însă disipată în atmosfera înconjură-

toare. Ca urmare, temperatura termistorului nu va creşte. Să admitem acuma că una dintre lămpi (de exemplu L_2) s-a ars. În primul moment, căderea de tensiune se concentrează mai ales la bornele termistorului TR_2, conectat în paralel cu lampa care a ieşit din funcţiune şi prin acesta va circula un curent de intensitate mai mare, care va începe să încălzească termorezistenţa. Simultan cu încălzirea treptată a termistorului va începe să crească intensitatea curentului care circulă prin el, pînă cînd intensitatea curentului care trece prin circuitul lămpilor va atinge o valoare aproximativ egală cu cea

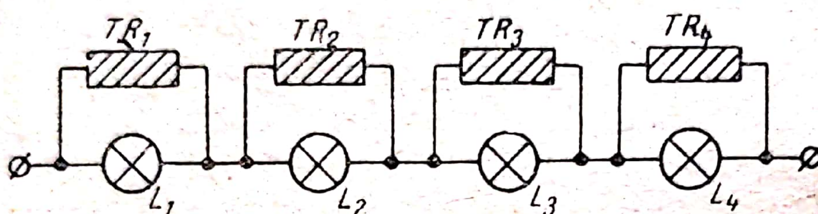


Fig. 18. Modul de conectare a termorezistenţelor de şuntare

anterioară şi lămpile vor ilumina din nou strălucitor.

Pentru funcţionarea în bune condiţiuni a instalaţiei descrise este necesar numai să se aleagă parametrii corespunzători ai termorezistenţelor conectate.

Folosirea termistoarelor semiconductoare a dat posibilitatea să se construiască aparate care măsoară viteza fluxurilor de lichide şi gaze, reglează temperatura, stabilizează o tensiune electrică, determină gradul de vid într-un vas din care se pompează aerul, efectuează măsurări în înaltă frecvenţă, compensează variaţiile unor diferite mărimi fizice, determină valoarea conductibilităţii termice a corpurilor solide, lichide şi gazoase, efectuează analiza gazelor şi fac multe alte operaţii.

Să vedem, de exemplu, cum se poate determina viteza unui flux de lichid, să zicem ţiţei, care circulă printr-o conductă, cu ajutorul unui termistor. În acest scop, în interiorul conductei se introduce un termistor cu suprafaţa relativ mare şi de formă aerodinamică. Termistorul este conectat într-un circuit şi prin el începe să circule un curent electric. Trecerea curentului este totdeauna însoţită de o creştere a temperaturii corpului prin care circulă curentul. În consecinţă termistorul se va încălzi. Temperatura lui ar creşte continuu dacă nu ar exista schimbul de căldură. Lichidul care circulă prin conductă, în cazul nostru ţiţeiul, răceşte însă termistorul şi anume cu atît mai mult, cu cît viteza lui de curgere este mai mare.

Aceasta face ca pentru fiecare valoare a vitezei lichidului care curge, termistorul să capete o anumită temperatură strict determinată. O temperatură strict determinată a termistorului corespunde însă unei intensități strict determinate a curentului care circulă prin el. Prin urmare, rezultă că o dată cu creşterea vitezei de curgere a lichidului prin conductă se accentuează schimbul de căldură cu suprafaţa termistorului, datorită cărui fapt temperatura lui scade, iar concomitent cu aceasta se micşorează şi intensitatea curentului indicată de galvanometru, ale cărui diviziuni sînt gradate nu în unităţi de curent, ci în unităţi care exprimă viteza de curgere. Un principiu aproximativ analog se află la baza construcţiei vacuummetrelor cu semiconductoare, nişte aparate care măsoară gradul de vid. În acest caz, însă, schimbul de căldură diferit este legat de rarefierea diferită a aerului.

În ultimul timp, termistoarele au început să fie folosite cu succes în tehnica bolometrelor. Bolometrul este un aparat care măsoară energia de radiaţie. Construcţia bolometrelor se bazează pe principiul transformării energiei radiante în energie termică.

Elementul principal al bolometrului este un termistor de forma unei plăcuţe subţiri, confecţionată dintr-o substanţă semiconductoare specială. Această plăcuţă este conectată într-un circuit electric cu galvanometru. Cînd plăcuţa semiconductoare este în obscuritate, acul galvanometrului este la zero. Este suficient însă ca spre plăcuţă să se dirijeze o rază de lumină, pentru ca acul galvanometrului să devieze aproape imediat. Aceasta se întîmplă deoarece razele luminoase, fiind absorbite de plăcuţa semiconductoare, o încălzesc, iar acest fapt — la rîndul lui — duce la scăderea rezistenţei plăcuţei şi prin întregul circuit începe să circule un curent de intensitate mai mare. Iată, în principiu, funcţionarea şi construcţia bolometrului. În instalaţiile reale folosite în exploatare, elementul semiconductor fotosensibil este amplasat în vid într-un balon metalic sau de sticlă, prevăzut cu o ferestruică dintr-un material transparent oarecare, ce lasă să treacă razele de lungimi de undă corespunzătoare.

Sensibilitatea unui bolometru cu semiconductor este extrem de mare. Aceasta permite folosirea lui pentru cele mai variate scopuri, inclusiv pentru detectarea corpurilor încălzite, aşezate la o distanţă relativ mare de aparat. Astfel, de exemplu, un bolometru aşezat în focarul unei oglinzi parabolice,

poate „percepe“ radiaţia termică a feţei unui om care se află la o distanţă de peste 100 m de oglindă.

Toate corpurile, fără excepţie, emit radiaţii infraroşii, invizibile pentru ochi, indiferent dacă corpul este încălzit puternic sau nu. Această împrejurare permite ca bolometrul să detecteze un asemenea corp încălzit chiar în cazul cînd el se găseşte la o distanţă relativ mare, de cîţiva kilometri. Să presupunem că zboară un avion. Motorul lui are o temperatură relativ înaltă şi, din această cauză, el emite radiaţii infraroşii intense, captate foarte bine de un bolometru cu semiconductor. Iată şi un alt exemplu. În timpul nopţii navighează un vapor, iar un observator nu-l vede. Temperatura unei părţi oarecare a vaporului, de exemplu a coşului lui, este mai mare decît temperatura aerului. Acest fapt este suficient pentru ca bolometrul să poată detecta prezenţa vasului. Exact în acelaşi fel se detectează tancurile, automobilele, motocicletele şi alte obiecte care au părţi încălzite.

Goniometrarea termică (aşa se numeşte această metodă de detectare a obiectelor încălzite) completează radiolocaţia în cazurile cînd aceasta din urmă nu poate fi folosită.

Cît de mare este sensibilitatea dispozitivelor bolometrice actuale se poate aprecia după faptul că cu ajutorul lor s-a reuşit să se înregistreze razele infraroşii reflectate de lună.

Cu fiecare an se extinde din ce în ce mai mult domeniul aplicaţiilor termistoarelor care în afară de sensibilitatea la variaţii de temperatură, posedă o serie întreagă de proprietăţi preţioase: dimensiuni mici, greutate redusă, rezistenţă mecanică mare, durată de serviciu îndelungată. Ele nu au nici un fel de piese mobile, nu necesită contacte speciale şi sînt extrem de simple în ce priveşte mînuirea.

2. REZISTENŢE NELINIARE

Asemănător cu dispozitivele care tocmai au fost descrise în ce priveşte principiul de funcţionare, este şi un alt dispozitiv semiconductor — descărcătorul pentru timpul de furtună. El îndeplineşte o funcţiune foarte utilă: protejează liniile de înaltă tensiune împotriva avariilor, în cazul unei lovituri de trăznet.

Intregul teritoriu al U.R.S.S. este acoperit de o reţea de linii de înaltă tensiune, artere care alimentează cu energie electrică oraşele cu industria lor puternic dezvoltată. In

aproape cea mai mare parte a anului, aceste linii de transport sînt expuse unui pericol serios — lovitura trăznetului. În timpul căderii trăznetului, în linie apare o supratensiune, care adesea scoate din funcțiune transformatorul de la o substație. Cum să se protejeze linia împotriva acestei calamități? În acest scop, pe stîlpii pe care se montează conductorii se instalează paratrăznete, dar acestea nu sînt întotdeauna de folos. Vine atunci în ajutor descărcătorul cu semiconductor.

Funcționarea descărcătorului se bazează pe faptul că rezistența semiconductorului, începînd de la o valoare oarecare a intensității cîmpului electric, începe să scadă brusc dacă cîmpul electric continuă să crească. Construcția descărcătorului este realizată în așa fel, încît să includă unul sau — de cele mai dese ori — mai multe discuri din substanță semiconductoare, conectate în serie (fig. 19). Prin intermediul unor conductoare metalice, capătul superior al descărcătorului se leagă la linie, iar cel inferior — la pămînt. În condiții normale, rezistența descărcătorului este atît de mare, încît curentul preluat de ea de la linie este foarte mic. În momentul căderii trăznetului, cînd în linie se creează o supratensiune considerabilă, rezistența descărcătorului scade mult și curentul de descărcare se scurge la pămînt. Acest proces durează pînă cînd tensiunea liniei devine din nou normală.

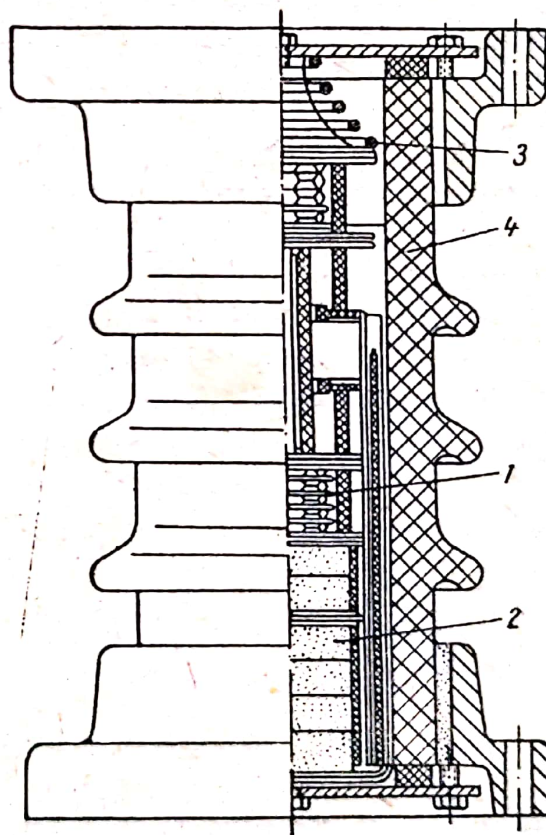


Fig. 19 Construcția unui descărcător pentru timp de furtună:
1 — spații disruptive, *2* — discuri de vilit, *3* — carcasă de porțelan, *4* — resort de apăsare

Descărcătoarele pentru timp de furtună constituie unul dintre tipurile de așa-numite rezistențe nelienare — dispozitive confecționate din materiale la care se observă o abatere de la legea lui Ohm. Rezistențele neliniare au multiple aplicații și în toate tipurile posibile de instalații radio-

tehnice. Construcţia lor este simplă. Din pulbere de carbură de siliciu (SiC), adăugîndu-se o substanţă liantă, se presează discuri de dimensiuni mici, care apoi sînt supuse unui anumit tratament termic. Pe discuri se presează electrozi metalici cu borne pentru contacte exterioare. Uneori, un asemenea disc se introduce într-o carcasă ceramică închisă ermetic, care îl protejează împotriva acţiunii dăunătoare a umidităţii aerului.

Rezistenţele neliniare, numite adesea şi varistoare, se lipesc uşor, cu un aliaj de lipit obişnuit, direct la conductoarele circuitului sau pot fi montate în acesta într-un alt mod.

3. CONTOARE CU CRISTAL

Mecanismul apariţiei electronilor de conducţie în semiconductoare creează toate condiţiile necesare pentru folosirea lor în fizica nucleară experimentală.

Metodica cercetărilor experimentale legate de studiul nucleului atomic este extrem de complicată şi implică un număr considerabil de aparate complicate. Orice simplificare a unui aparat, mărirea siguranţei lui de funcţionare şi micşorarea dimensiunilor lui are o mare importanţă. Printre aceste aparate complicate există unele a căror destinaţie constă în numărarea cu precizie a particulelor elementare: protoni, deutroni, particule α şi altele, care sînt emise de un obiect oarecare în timpul experienţei. În ultimii ani, pentru simplificarea aparatajului din laboratoarele de fizică, au început să se folosească contoare cu semiconductoare. Ideea pe care se bazează un contor de particule cu semiconductoare, sau — cum mai este numit uneori — cu cristal, este simplă. Dintr-o substanţă semiconductoare adecvată se confecţionează o plăcuţă de dimensiuni mici, care este conectată într-un circuit electronic special. Se dirijează spre plăcuţă fluxul de particule al căror număr trebuie determinat. Particulele, pătrunzînd în semiconductor, provoacă apariţia în acesta a electronilor de conducţie, ceea ce se manifestă instantaneu prin creşterea curentului electric care trece prin plăcuţa semiconductoare şi prin aparatele de măsurat corespunzătoare. Acestea din urmă sînt etalonate în aşa fel, încît în locul intensităţii curentului să indice direct numărul de particule incidente la suprafaţa plăcuţei semiconductoare. Se înţelege de la sine că realizarea unui contor cu cristal s-a dovedit posibilă numai

datorită faptului că numărul de electroni de conducție care apar este proporțional cu numărul de particule elementare incidente la suprafața contorului cu semiconductor.

4. ELEMENTE DE ÎNCĂLZIRE

Obținerea unor temperaturi înalte în cuptoare este o problemă care are o mare importanță practică. Multe procese tehnologice se bazează pe folosirea unui tratament termic la temperaturi înalte.

În numeroase cazuri, sînt extrem de necesare cuptoare electrice de încălzire cu volum mic, însă la temperaturi relativ înalte, care ajung pînă la 1500°C. Folosirea în acest scop a unor sîrme obișnuite, din aliaje de tip nicrom, nu dă rezultate, deoarece aceste aliaje se topesc sau se oxidează chiar la temperaturi care depășesc cu puțin 1000°C. Există însă și metale cu temperatură de topire înaltă. Dintre acestea fac parte: paladiul, platina, rodiul, iridiul, ruteniul, osmiul, molibdenul, wolframul și altele. Primele șase metale nu sînt folosite în scopul menționat, mai ales din cauza costului lor ridicat. Molibdenul arde repede atunci cînd este încălzit în aer, transformîndu-se în anhidridă de molibden (MoO_3). Wolframul se oxidează repede la temperatura de călire la roșu și este folosit numai pentru cuptoare speciale cu vid. Alte metale greu fuzibile, din diferite cauze, nu pot fi nici ele folosite drept elemente de încălzire electrice.

Utilizarea semiconductoarelor în acest scop s-a dovedit foarte eficace. Unele substanțe semiconductoare posedă nu numai o temperatură de topire înaltă, dar și o mare stabilitate în aer. Compușii de acest fel sînt potriviți pentru confecționarea elementelor de încălzire ale cuptoarelor electrice pentru temperaturi înalte. Dintre aceste cuptoare fac parte, de exemplu, cuptoarele cu elemente de încălzire confecționate sub formă de bare din carbură de siliciu cu anumite adaosuri.

Prin proprietățile lor fizice, barele de carbură de siliciu satisfac practic toate condițiile necesare. Coeficientul lor de dilatare liniară este foarte mic și, de aceea, barele nu se deformează în timpul încălzirii. In plus, dozînd judicios cantitatea de diferite adaosuri introduse, se pot obține bare cu rezistență specifică diferită, ceea ce prezintă avantaje incontestabile.

La majoritatea acestor cuptoare, recipientul de încălzire este un cilindru în pereții căruia se introduc barele de carbură

de siliciu, conectate una cu alta fie în serie, fie în paralel, fie — în fine — mixt. Capetele barelor sînt metalizate, pentru îmbunătățirea contactului electric. La acestea se conectează conductoarele care merg la bornele cuptorului, prin intermediul cărora cuptorul este legat la o rețea de curent alternativ cu tensiunea de 220 V.

Diferitele tipuri de cuptoare cu carbură de siliciu sînt calculate pentru diverse puteri. Ele permit încălziri pînă la 1500°C.

5. CELULE REDRESOARE SEMICONDUCTOARE

O importanță mereu crescîndă în diferite ramuri ale tehnicii capătă celulele redresoare semiconductoare de curent alternativ.

Datorită faptului că transportul în curent continuu la distanțe mari este legat de pierderi considerabile de energie, centralele electrice industriale produc numai curent alternativ. Totuși, în unele ramuri ale tehnicii se folosește curentul continuu. Astfel, de exemplu, în industria metalurgică unele metale pure se obțin pe cale electrolitică, adică prin trecerea unui curent continuu printr-o baie electrolitică. Argintarea, nichelarea, cromarea, în general acoperirea pieselor cu un strat metalic subțire, se realizează de asemenea cu ajutorul unor procese electrolitice. Tramvaiele, troleibuzele și alte cîteva tipuri de mijloace de transport folosesc numai curentul continuu. La fel, curentul continuu este necesar și pentru încărcarea acumulatoarelor. Prin urmare, apare problema acută a obținerii curentului continuu din curent alternativ. Această problemă a fost de mult rezolvată. În acest scop se folosesc redresoare de tipuri, construcții și sisteme diferite: redresoare de mare putere cu vapori de mercur, grupuri motor-generator, redresoare cu tuburi electronice. Toate acestea, bineînțeles, posedă anumite avantaje și, natural, dezavantaje. Deficiența principală este randamentul relativ scăzut al funcționării lor, care — pe deasupra — mai depinde și de tensiunea de lucru. În virtutea acestui fapt, transformarea curentului alternativ în continuu este întotdeauna însoțită de pierderi destul de mari. Unele tipuri de redresoare au o durată de serviciu redusă. Toate tipurile de redresoare necesită o întreținere de zi cu zi și o permanentă supraveghere. În plus, printre instalațiile redresoare nu există nici una care să fie absolut convenabilă pentru diferite scopuri și diverse re-

gimuri de exploatare. Această situaţie a inspirat cercetătorilor ideea necesităţii de a se căuta alte procedee de redresare a curentului alternativ. Folosirea în acest scop a semiconductoarelor s-a dovedit a fi mai raţională, mai avantajoasă din punct de vedere economic şi cea mai comodă metodă de transformare a unui fel de curent în altul.

În primul capitol al acestei cărţi s-a arătat că un sistem format din două semiconductoare, unul electronic şi altul cu goluri, care sînt în contact unul cu altul, poate redresa curentul alternativ. Rezistenţa unui asemenea sistem, în funcţie de sensul curentului, devine cînd foarte mare, cînd relativ mică. Ca rezultat, curentul va circula de preferinţă într-un singur sens, în timp ce în celălalt sens el va fi foarte mic.

Din însăşi esenţa acestui fenomen rezultă imediat principiile care stau la baza construcţiei celulelor redresoare cu semiconductor. Tehnologia confecţionării lor este elaborată în aşa fel, încît să se realizeze un contact sigur între un semiconductor electronic şi unul cu goluri. Pe ce cale se înfăptuieşte aceasta? Există mai multe mijloace. Cel mai utilizat mijloc se bazează pe binecunoscuta proprietate a semiconductoarelor de a căpăta un mecanism de conductibilitate electrică fie electronic, fie prin goluri, prin influenţa adaosurilor corespunzătoare introduse în substanţa semiconductoare. Această proprietate remarcabilă permite să se creeze o joncţiune *p—n* într-o substanţă semiconductoare de aceeaşi compoziţie chimică, fără a se recurge la contactul a două semiconductoare diferite, ceea ce ar complica extrem de mult rezolvarea întregii probleme. Să studiem, ca exemplu, tehnologia confecţionării celulelor redresoare cu oxid cupros. Aceasta ne va ajuta să înţelegem cum se obţine în practică o joncţiune *p—n*.

Dintr-o plăcuţă de cupru cu grosimea de 1 mm se ştanţează discuri de dimensiunile necesare, avînd în centru o deschizătură de diametru mic pentru trecerea bulonului de asamblare. Discurile ştanţate sînt curăţate cu grijă şi supuse (pentru degresarea completă a cuprului) unei spălări minuţioase cu o soluţie de 30% sodă caustică şi apoi în apă curgătoare. Discurile tratate cu sodă caustică sînt cufundate timp de 15 secunde în acid azotic concentrat, iar apoi sînt spălate, timp de 3—5 minute, în apă curgătoare, sau cel mai bine în apă distilată. După spălare urmează uscarea discurilor pe hîrtie de filtru sau într-un termostat.

Se efectuează apoi operaţia principală: discurile spălate şi uscate sînt aşezate două cîte două pe un suport din oţel

rezistent la temperaturi înalte, care se introduce într-un cuptor electric încălzit pînă la o temperatură de 1020—1040°C. Temperatura cuptorului se controlează cu grijă. Discurile de diametre mai mari se introduc în cuptor nu pe un suport metalic, ci înşirate pe o tijă de oţel.

În cuptor, toate părţile exterioare ale discurilor de cupru se acoperă, după 10—15 minute, cu un strat de oxid cupros (Cu_2O) avînd grosimea de aproximativ 0,1 mm. Părţile ascunse ale discurilor, îndreptate spre suportul metalic, nu se oxidează practic de loc, datorită accesului dificil al oxigenului la suprafeţele lor. La drept vorbind, în cazul unui asemenea procedeu de aşezare, discurile aflate direct pe suportul metalic constituie un fel de garnituri. Ele sînt destinate special acestui scop şi servesc vreme îndelungată.

Proprietăţile electrice ale oxidului de cupru depind în mare măsură de procesul ulterior de răcire a discurilor. Pentru obţinerea unor rezultate optime, discurile fierbinţi sînt scoase din cuptor şi introduse foarte repede într-un alt cuptor, aflat alături. În al doilea cuptor se asigură trecerea treptată de la temperatura de oxidare la o temperatură mai scăzută, la care se stabileşte cea mai avantajoasă distribuţie a impurităţilor în grosimea stratului de Cu_2O. Temperatura celui de-al doilea cuptor variază de obicei de la 450 pînă la 600°C. În el discurile sînt ţinute, în funcţie de dimensiunile lor, de la 8 pînă la 5 minute, apoi sînt răcite imediat cu apă curgătoare rece.

În timpul cît discurile se găsesc în cel de-al doilea cuptor, pe stratul de oxid cupros se formează un strat de oxid cupric (CuO) slab conducător, care se îndepărtează prin cufundarea rondelelor timp de 3—5 minute într-o soluţie de 30% acid azotic (HNO_3). Apoi, discurile se spală şi se usucă. După toate aceste operaţii, pe suprafaţa de oxid cupros se depune aşa-numitul electrod superior. Există mai multe procedee de depunere a acestuia. Vom vorbi despre unul dintre ele. Se pregăteşte o soluţie de 7,5% şelac în alcool etilic. La 70 de părţi de soluţie de şelac se adaugă 30 părţi de pulbere fină de grafit. Cu întregul amestec, se acoperă cu grijă suprafaţa de oxid cupros a discului. După uscare, pe stratul de grafit se depune — prin metoda pulverizării — un strat metalic.

Dacă un disc cu oxid cupros este introdus într-un circuit care conţine un generator de tensiune alternativă, atunci va

circula un curent perceptibil numai într-un singur sens — cel de trecere sau direct. În sens invers, intensitatea curentului va fi mult mai mică. Sensul de trecere corespunde minusului la cupru, adică la electrodul inferior, şi plusul — la electrodul superior.

Ciclul tehnologic de confecţionare a unui disc redresor cu oxid cupros, care a fost tocmai descris, este aranjat în aşa fel, încît oxidul de cupru — prin proprietăţile lui electrice — să constituie un mediu neomogen, format dintr-o parte cu conducţie electronică şi o parte cu conducţie prin goluri. În timpul oxidării discului de cupru în primul cuptor şi al răcirii lui ulterioare în cel de-al doilea, oxidul cupros — care aderă direct la cupru — se saturează cu cupru. Numărul suplimentar de atomi de cupru, care au în acest caz rolul de adaosuri donoare, comunică stratului de oxid cupros, care aderă la electrodul inferior, să apară un mecanism de conducţie electronic. Straturile exterioare ale oxidului cupros conţin impurităţi de atomi de oxigen, care le atribuie o conducţie prin goluri. La limita de separaţie între aceste porţiuni de oxid cupros şi cuprinzîndu-le parţial, se localizează stratul de blocare. Prin urmare, întreaga grosime a oxidului cupros constituie de fapt un fel de „sandviş" compus dintr-o parte cu goluri şi una cu electroni, cu stratul de blocare la mijloc (fig. 20).

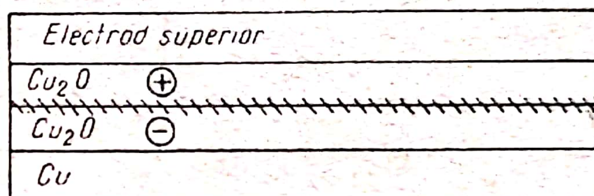


Fig. 20. Structura schematică a unui redresor cu oxid cupros. Regiunea haşurată reprezintă stratul de blocare

Un disc redresor de acest fel nu poate suporta tensiuni înalte. De aceea se conectează în serie mai multe discuri, formînd coloane redresoare (fig. 21). În funcţie de destinaţia

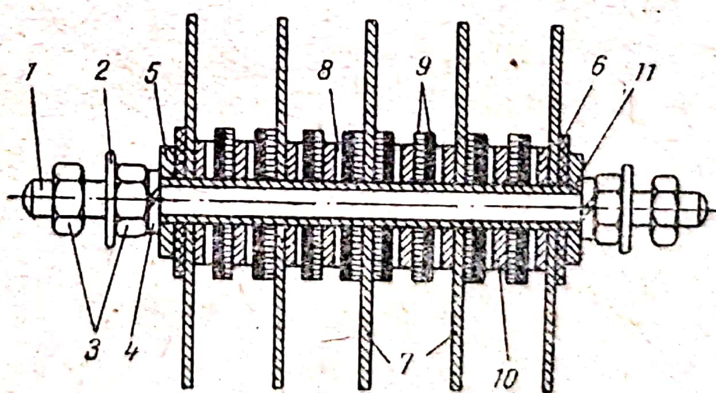


Fig. 21. Construcţia unei coloane din discuri cu oxid cupros:
1 — bulon de asamblare, 2 — şaibă, 3 — piuliţă, 4 — şaibă, 5 — şaibă de apăsare, 6 — şaibă izolantă, 7 — radiatoare, 8 — şaibă de plumb, 9 — disc redresor, 10 — şaibă de distanţare, 11 — tub izolant

redresorului, coloanele se asamblează din grupuri formate din discuri legate în serie, în paralel sau mixt.

Celulele redresoare cu oxid cupros nu constituie unicul tip de celule redresoare semiconductoare. Aplicaţii tot atît de vaste au şi celulele redresoare cu seleniu. În ultimii ani, se răspîndesc din ce în ce mai mult celulele (diodele) redresoare din germaniu.

Celulele redresoare cu semiconductoare sînt mult folosite în tehnica redresării şi în prezent, în ce priveşte indicii lor, au întrecut pe toţi predecesorii lor. Ele se confecţionează simplu, au o durată de serviciu îndelungată şi rezistenţă mecanică mare; în plus nu necesită circuit de încălzire, ca — de exemplu — tuburile electronice redresoare. Avantajul principal al redresoarelor semiconductoare moderne construite din germaniu constă în randamentul lor ridicat care atinge 98%. În ciuda dimensiunilor mici, redresoarele cu germaniu sînt capabile să redreseze curenţi de sute de amperi şi există toate motivele să se creadă că în viitorul apropiat ele vor ocupa un loc preponderent în tehnica redresării.

6. DIODE CU CRISTAL *)

Acum cîteva zeci de ani, cînd tocmai începuseră să fie folosite în tehnica telecomunicaţiilor primele receptoare fără tuburi electronice, detectorul cu cristal — cu ajutorul căruia se transformau semnalele recepţionate — a avut un rol primordial. La început, pentru detecţie se utilizau cristale naturale, de exemplu galena, pirita, zincita, casiterita, carborundul, arseno-pirita, calcopirita şi altele.

Detectorul cu cristal era format dintr-o capsulă în care era lipit un cristal detector oarecare şi un resort mobil de contact cu vîrful ascuţit. Cînd se lucra cu un asemenea detector, trebuia să se găsească pe cristal punctul necesar, ceea ce era foarte incomod.

Timp de cîţiva ani, detectoarele cu cristal au dominat tehnica telecomunicaţiilor, pînă cînd a început fabricarea pe scară industrială a tuburilor electronice, care au provocat o adevărată revoluţie în radiotehnică. O dată cu apariţia tuburilor electronice, detectoarele cu cristal au fost obligate să treacă pe planul al doilea. Pătrunderea tuburilor electronice în radiotehnică a fost atît de puternică şi triumfală, încît nu

*) Mai sînt denumite şi „diode semiconductoare"

mai exista nici o îndoială că detectoarele cu cristal erau detronate pentru totdeauna. Se părea că noua tehnică electronică, mai perfecţionată, va înregistra, în analele ei de dezvoltare, numai pe scurt şi în trecere, faptul că au existat cîndva, pentru foarte scurt timp, detectoarele cu cristal. Această previziune nu s-a adeverit însă de loc. Tocmai dezvoltarea intensă a radiotehnicii a impus renaşterea detectoarelor cu cristal, fără de care ar fi imposibil să se rezolve în întregime problemele legate de tehnica undelor foarte scurte. Războiul distrugător cu fascismul german, care a necesitat eforturi uriaşe din partea lagărului progresist, a obligat fizicienii şi inginerii să-şi dubleze şi să-şi tripleze ritmul cercetărilor militare. Printre ultimele realizări au fost şi instalaţiile de radiolocaţie al căror principiu de funcţionare se bazează pe folosirea undelor electromagnetice de lungime de undă foarte scurtă. Foarte curînd s-a înţeles că pentru funcţionarea în bune condiţii a instalaţiilor de radiolocaţie este necesar ca tuburile redresoare electronice să fie înlocuite cu alte dispozitive. Este vorba de faptul că, în gama undelor centimetrice capacitatea dintre electrozii tubului şi timpul de trecere a electronilor prin tub începe să joace un rol negativ, care influenţează puternic asupra funcţionării radiolocatorului. Inginerii şi fizicienii care se ocupau cu tehnica radiolocaţiei au ajuns la concluzia cît se poate de corectă că cel mai bun înlocuitor al tubului electronic poate deveni detectorul cu cristal semiconductor. Pentru scopurile menţionate era însă necesar un detector cu parametri electrici deosebiţi. În plus era esenţial să se realizeze un detector care să posede un nivel de zgomot cît mai scăzut. Tipurile vechi de detectoare cu cristale naturale, fireşte, nu erau potrivite pentru înlocuirea tuburilor electronice cu vid. Această situaţie a stimulat începerea unor cercetări intense pentru elaborarea unor noi tipuri de detectoare cu cristal, în mare măsură lipsite de dezavantajele inerente tuburilor electronice. Curînd după terminarea războiului, această problemă a fost în linii mari rezolvată şi radiotehnicienii care lucrează cu unde scurte au avut la dispoziţie un număr destul de mare de detectoare cu cei mai diferiţi parametri, confecţionate din siliciu şi germaniu.

Germaniul este un element chimic care posedă proprietăţi semiconductoare. El se găseşte în grupa a IV-a a sistemului periodic al lui Mendeleev. Numărul lui de ordine este 32, iar greutatea atomică 72,6. Prin compoziţia lui chimica, germaniul se aseamănă cu carbonul, siliciul şi staniul cenuşiu.

Germaniul are o rețea cristalină de tipul celei a diamantului. Temperatura lui de topire este de 958°C, densitatea de 5.35 g/cm³, iar conductivitatea σ este cuprinsă între limite largi, care cuprind cel puțin cinci ordine de mărime: de la 1 000 pînă la $10^{-2}\ \Omega^{-1}\ cm^{-1}$. Această gamă largă de valori ale lui σ se explică, ca și pentru toate felurile de semiconductoare, prin concentrația și tipul de adaosuri de atomi străini, introduși în rețeaua lui cristalină. Influența adaosurilor asupra proprietăților electrice ale germaniului joacă un rol important, în afară de toate și datorită faptului că atomii adaosurilor care aparțin grupei a III-a a sistemului periodic, de exemplu borul, aluminiul, galiul, indiul, taliul, comunică germaniului o conducție prin goluri, în timp ce impuritățile din grupa a V-a (vanadiul, stibiul, bismutul și altele) — îi comunică una electronică. Influența adaosurilor asupra proprietăților electrice ale germaniului este atît de mare, încît un atom de adaos la 10^7—10^8 atomi de germaniu îi mărește conductibilitatea electrică. Prin urmare, cu ajutorul unor cantități neînsemnate de atomi de adaosuri introduse în rețeaua cristalină a germaniului, se poate obține germaniu cu proprietăți electrice stabilite în prealabil, ceea ce are o importanță hotărîtoare, permițînd să se fabrice diode de germaniu cu parametri electrici foarte buni.

Detectorul de cristal cu germaniu este un redresor de curent alternativ care conduce bine curentul într-un sens (sensul de trecere) și rău în sens opus (sens de blocare). Să examinăm construcția lui.

Un cristal mic de germaniu, cu conducție electronică și avînd dimensiunile de aproximativ $1{,}5 \times 1{,}5 \times 0{,}5$ mm, este lipit pe unul din cele două piciorușe ale detectorului. Suprafața exterioară a cristalului este șlefuită cu grijă și apoi supusă unei prelucrări chimice. Ca rezultat al acestei prelucrări, un strat superficial subțire al cristalului capătă noi proprietăți: conductibilitatea lui electrică devine cu goluri. În consecință, în locul unui cristal anterior omogen în ce privește proprietățile lui electrice, se obține un cristal în care germaniul cu conducție electronică vine în contact direct cu germaniul cu conducție prin goluri.

La celălalt piciorуș al detectorului se fixează un resort de contact din sîrmă subțire de wolfram. Capătul liber al resortului este ascuțit. Ambele piciorușe ale detectorului se lipesc, cu un clei special, de o capsulă ceramică. Capătul ascuțit al resortului este apăsat pe cristal. Detectorul cu germa-

niu, al cărui aspect exterior şi secţiune sînt arătate în fig. 22, posedă proprietăţi de redresare foarte bune. Dacă prin acest element se lasă să treacă un curent electric, sensul direct de trecere va corespunde cazului cînd curentul merge de la resort spre cristal, adică atunci cînd la resort se află plusul, iar la cristal — minusul.

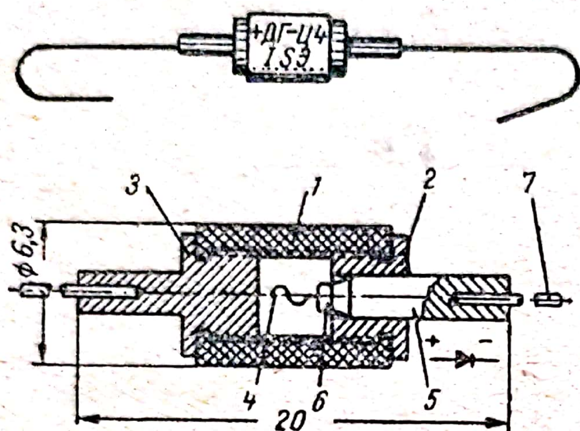


Fig. 22. Aspectul exterior şi secţiune printr-un detector cu germaniu cu contact punctiform tip ДГ - Ц4 (dimensiunile în milimetri):

1 — bucşă ceramică, 2 şi 3 — flanşe metalice, 4 — sondă de wolfram, 5 — montura cristalului, 6 — cristal de germaniu, 7 — borne metalice

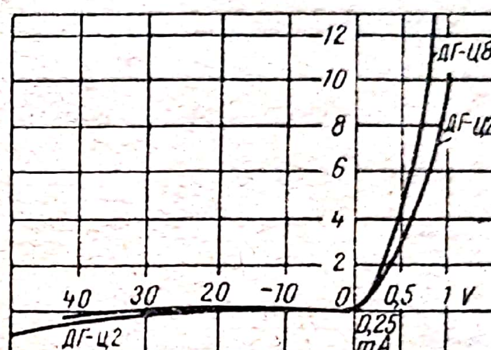


Fig. 23. Caracteristicile tensiune-curent ale diodelor cu germaniu ДГ - Ц2 şi ДГ - Ц8

În fig. 23 sînt reprezentate caracteristicile tensiune-curent ale detectoarelor cu germaniu de înaltă tensiune. Din aceste caracteristici reiese că coeficientul de redresare al detectoarelor cu germaniu este excesiv de mare.

La tensiuni joase, de circa 1 V, acest coeficient poate atinge valori mai mari decît 10^5.

Detectoarele cu germaniu fabricate de industria sovietică pot funcţiona sigur pînă la frecvenţa de 150 MHz.

În afară de detectoarele cu germaniu, au căpătat o largă răspîndire şi detectoarele cu siliciu, în care — în locul cristalelor cu germaniu — sînt montate cristale de siliciu.

Detectoarele de tipul descris se numesc cu contact punctiform, deoarece suprafaţa cristalului redresor vine în contact cu vîrful ascuţit al unui resort metalic şi, de aceea, suprafaţa de contact electric este mică.

Diodele cu cristal cu contact punctiform sînt folosite pe scară foarte largă în tehnica frecvenţelor ultraînalte, unde ele sînt dispozitive practic de neînlocuit. Capacitatea neglijabilă a detectorului, absenţa circuitelor de încălzire, dimensiunile

mici, rezistența mecanică mare, durata de serviciu îndelungată, forma carasteristicii tensiune-curent și alte calități ale detectoarelor cu cristal le fac să fie elemente extrem de importante și necesare pentru multe instalații radiotehnice.

Marile avantaje ale detectoarelor cu cristal moderne, care — pe deasupra — nu necesită reglare și acordare, le-au deschis vaste perspective. Dioda cu cristal actuală este un dispozitiv care devine din ce în ce mai necesar pe măsură ce timpul trece. Acest fapt se observă deosebit de bine considerînd exemplul ultimelor descoperiri care au permis crearea unor noi tipuri de diode cu cristal ce posedă posibilități și perspective mult mai mari decît predecesoarele lor. Aceste remarcabile dispozitive, construite conform principiului joncțiunilor *p—n*, au provocat o adevărată revoluție în radiotehnică. Spre deosebire de detectoarele cu contacte punctiforme descrise mai sus, noile tipuri de diode au căpătat denumirea de diode cu joncțiune sau diode *p—n*.

Să le descriem.

Ideea pe care se bazează diodele de germaniu cu joncțiune nu introduce nimic nou din punct de vedere principial, și de fapt a fost folosită la elaborarea tehnologiei sistemelor redresoare examinate mai sus. Ea constă în crearea, într-un cristal de germaniu monolit, a două regiuni cu mecanism de conducție diferit: prin goluri și prin electroni. Întregul sens al acestei idei constă tocmai în faptul că pentru obținerea efectului de redresare nu este necesar ca un cristal de germaniu cu goluri să fie pus în contact cu un cristal de germaniu electronic, ci prin metode artificiale să se obțină, dintr-un cristal electronic, un cristal care posedă un mecanism de conducție parțial electronic și parțial prin goluri. Între regiunea electronică și cea cu goluri ale cristalului, și cuprinzîndu-le parțial, apare o joncțiune *p—n*.

În ce mod se realizează în practica joncțiunea *p—n*? Pentru rezolvarea acestei probleme este necesar ca în germaniul electronic să se introducă adaosuri de elemente din cea de-a treia grupă a sistemului periodic, care — după cum se știe — comunică germaniului un mecanism de conducție prin goluri. Întreaga subtilitate a procesului constă însă aici în faptul că adaosurile introduse nu trebuie să pătrundă în întreaga grosime a germaniului, ci numai pînă la o anumită adîncime. Dacă adaosurile vor intra în întregul volum al cristalului, atunci tot cristalul va căpăta conducție prin goluri. Dacă însă adaosurile vor pătrunde numai pînă la o adîncime oarecare *d*,

cu bună ştiinţă mai mică decît grosimea l a cristalului, atunci domeniul de adîncime d va poseda conductibilitate prin goluri, iar restul — electronică. Lucrînd la rezolvarea acestei probleme, fizicienii au învăţat pînă la urmă să introducă în aşa fel adaosurile, încît ele să pătrundă numai pînă la o adîncime mică din grosimea cristalului şi, totodată, să formeze o limită de separaţie, o joncţiune *p—n* suficient de netă, care să despartă partea cu goluri a cristalului de cea electronică.

În principiu, o joncţiune *p—n* poate fi realizată în germaniu prin diferite mijloace tehnice şi cu ajutorul unor diverse elemente din grupa a III-a a sistemului lui Mendeleev, însă răspîndirea cea mai largă, cel puţin în prezent, a căpătat-o procedeul descris în cele ce urmează. Se confecţionează o plăcuţă subţire din monocristal de germaniu de mare puritate, cu conducţie electronică şi pe una dintre suprafeţele lui se topeşte o bucăţică de indiu. Topirea indiului se face într-o cavitate bine vidată. În timpul topirii indiului, atomii lui difuzează pe un front larg, pînă la o anumită adîncime în cristalul de germaniu; ca rezultat, pe întinderea acestei zone germaniul capătă conducţie prin goluri. După aceea, la ambele suprafeţe ale cristalului se aplică şi se fixează electrozi, cristalul se montează într-o montură specială şi dioda cu germaniu capătă forma ei definitivă (fig. 24).

Inventarea diodelor cu germaniu cu joncţiune a constituit un mare pas înainte. Spre deosebire de alte redresoare, diodele cu germaniu posedă un randament foarte mare, care atinge 98%. În plus, diodele cu germaniu pot suporta tensiuni inverse de peste 1 000 V. Ele lasă să treacă în sensul direct un curent a cărui densitate atinge 1 000 A/cm², la o tensiune de numai 1 V. Durata lor de serviciu este de cel puţin 10 000 ore. Diodele cu germaniu au dimensiuni mici, posedă o rezistenţă mecanică bună, sînt uşor de mînuit, şi au — în comparaţie cu alte tipuri de redresoare — o serie întreagă de avantaje importante. Fireşte, capacitatea diodelor cu germaniu cu joncţiune este mai mare decît a detectoarelor

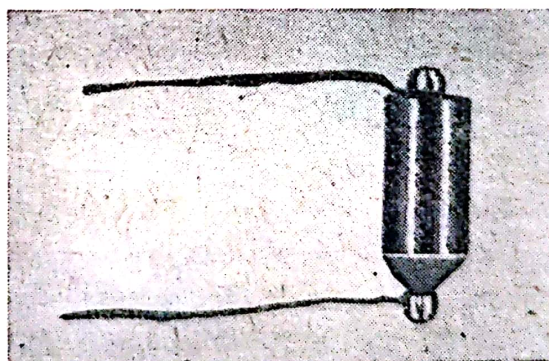


Fig. 24. Aspectul exterior al unei diode cu germaniu cu joncţiune

cu germaniu cu contat punctiform, de aceea ele nu sînt folosite în circuitele pentru frecvențe ultraînalte, dar sînt utilizate cu succes acolo unde frecvența nu depășește 50 kHz.

7. TRIODE SEMICONDUCTOARE

Uriașele succese obținute de fizicieni și ingineri în ce privește crearea diodelor cu siliciu și germaniu i-au stimulat să se ocupe și de o problemă absolut nouă: să caute alte căi de amplificare a oscilațiilor electrice, folosind în acest scop substanțe semiconductoare. Rezolvarea acestei probleme a necesitat cîțiva ani de muncă susținută și s-a sfîrșit printr-o reușită deplină: în 1948 a fost creat primul tip de triodă cu germaniu cu contacte punctiforme, care a căpătat denumirea de tranzistor.

Pentru un tranzistor cu contacte punctiforme se folosește germaniu cu conducție electronică și cu rezistivitatea $\varrho > 10\,\Omega.\mathrm{cm}$. Tehnologia confecționării tranzistoarelor este în multe privințe asemănătoare cu procesele tehnologice pe care se bazează fabricarea detectoarelor cu germaniu cu contact punctiform. Dintr-un monocristal de germaniu se taie plăcuțe extrem de subțiri, cu dimensiunile de circa $1{,}5 \times 1{,}5 \times 0{,}5$ mm. Suprafața interioară a plăcuței se metalizează și servește drept bază pentru tranzistor. Suprafața superioară a acestuia se șlefuiește, se lustruiește și se prelucrează chimic, apoi cristalul se lipește pe un piciorуș metalic. Pe suprafața superioară a cristalului se așază, la o distanță de 50 pînă la 250 μ una de alta, niște sîrmulițe ascuțite (sonde), confecționate fie din bronz fosforos, fie din wolfram. Ambele puncte ale cristalului de germaniu, cu care sondele vin în contact direct, au caracteristici tensiune-curent corespunzătoare unui detector cu tensiune de lucru inversă mare. Tranzistorul asamblat este conectat într-un circuit așa cum se arată în fig. 25. Unul dintre contactele punctiforme (în desen, cel din stînga), se numește emiter și, prin analogie cu un tub electronic cu vid, poate fi comparat cu catodul. Al doilea contact punctiform (cel din dreapta, în figură) se numește colector și corespunde anodului unui tub electronic. Emiterului i se aplică, de la o sursă de tensiune continuă, un potențial pozitiv mic V_e, ceea ce corespunde cu sensul direct de trecere al curentului prin cristal. La colector se aplică un potențial V_c negativ în raport cu baza și care depășește, în ce privește valoarea absolută, potențialul V_e aplicat emiterului. Semnul diferenței

de potențial dintre contactul punctiform al colectorului și bază condiționează sensul curentului în circuitul colectorului, care — spre deosebire de curentul emiterului — este negativ. Prin urmare, rezistențele contactelor punctiforme ale emiterului și colectorului diferă una de alta.

În circuitul emiterului, așa cum se arată în fig. 25, se conectează o tensiune alternativă, care trebuie amplificată. În circuitul colectorului se introduce rezistența adițională R de la bornele căreia se ia tensiunea alternativă amplificată. Deoarece peste tensiunea continuă a emiterului se suprapune tensiunea alternativă de la sursa exterioară, sincron cu variația potențialului emiterului se va schimba și intensitatea curentului din circuitul lui Această variație a intensității curentului din circuitul emiterului provoacă o variație corespunzătoare a intensității curentului din circuitul colectorului.

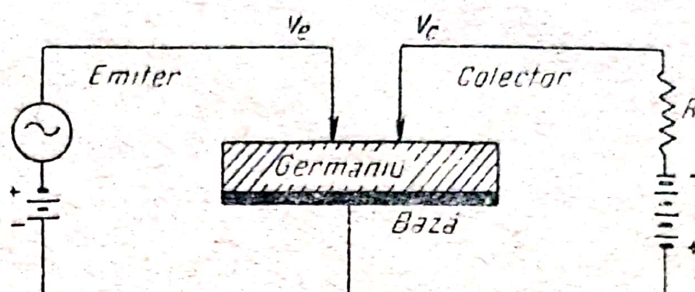


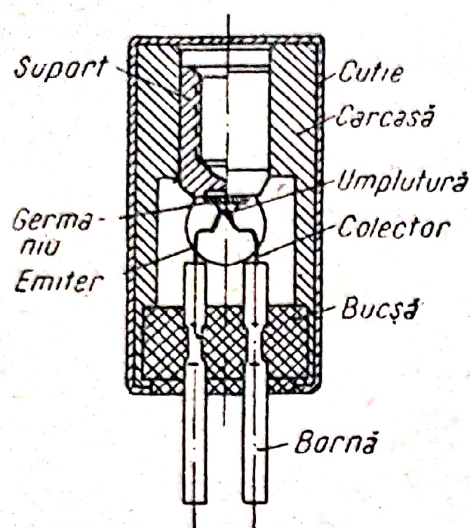
Fig. 25. Schema de conectare a unui tranzistor su contacte punctiforme

Variațiile mici ale tensiunii din circuitul emiterului provoacă, în circuitul colectorului, variații considerabile ale tensiunii alternative, care se culeg la bornele rezistenței de sarcină R.

Valoarea amplificării de tensiune pe care o dă un tranzistor poate atinge cîteva sute.

În fig. 26 sînt reprezentate aspectul exterior și o secțiune printr-un tranzistor cu germaniu cu contacte punctiforme. Imediat după tranzistoarele cu germaniu cu contacte punctiforme, au fost descoperite tranzistoarele cu joncțiune, cu care se pot obține puteri mai mari. Construcția tranzistoarelor cu germaniu cu joncțiune se bazează pe realizarea, într-un monocristal de germaniu, a unor joncțiuni *p—n—p* sau *n—p—n*. Ca exemplu vom examina pe scurt una dintre metodele de obținere a unui tranzistor *p—n—p*. Această metodă este deja cunoscută cititorilor. Pe suprafețele opuse ale unei plăcuțe extrem de subțiri tăiate dintr-un monocristal de germaniu cu conducție electronică, se topesc bucățele de indiu — element din grupa a III-a a sistemului periodic. În procesul de topire, un

număr oarecare din atomii indiului difuzează în germaniu. Ca rezultat, partea din mijloc a cristalului de germaniu va poseda, ca şi mai înainte, un mecanism de conducţie electronic, în timp ce regiunile din margine vor prezenta o conducţie prin goluri. La toate aceste trei regiuni ale cristalului — p, n şi p — se lipesc electrozi, cu ajutorul cărora tranzistorul poate fi conectat într-un circuit.



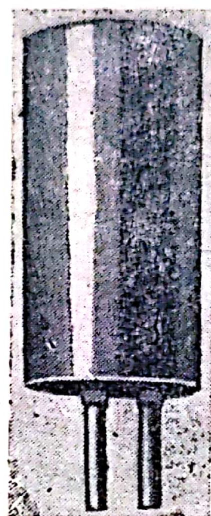


Fig. 26. Aspectul exterior şi secţiune printr-un tranzistor cu germaniu cu contacte punctiforme

Mecanismul funcţionării tranzistoarelor cu germaniu cu joncţiune se deosebeşte puţin, în principiu, de mecanismul funcţionării celor cu contacte punctiforme. Particularitatea esenţială care deosebeşte avantajos tranzistoarele cu joncţiune de cele punctiforme constă în faptul că puterea de ieşire a primelor este considerabil mai mare. Pentru unele tipuri, valoarea puterii de ieşire poate atinge 100 W şi chiar mai mult.

În fig. 27 este arătată secţiunea unui tranzistor cu joncţiune.

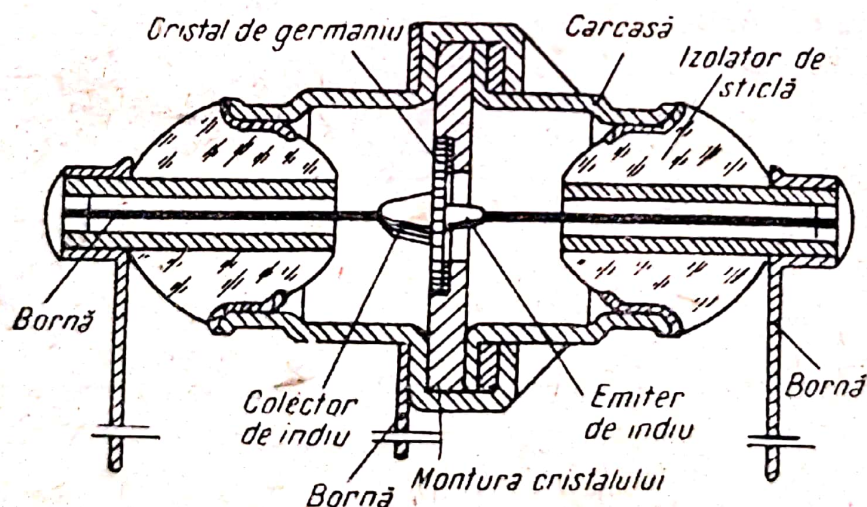


Fig. 27. Secţiune printr-un tranzistor cu germaniu cu joncţiune

Să studiem, folosind exemplul unui tranzistor cu germaniu cu contacte punctiforme, esenţa fizică a procesului de amplificare.

Fiecare punct al germaniului cu conducţie electronică, cu care vin în contact direct sondele, are o caracteristică tensiune-curent corespunzătoare unei diode cu cristal. Cu alte cuvinte, în fiecare punct există o joncţiune *p—n*, condiţionată de faptul că printr-o prelucrare specială se creează, pe suprafaţa germaniului *n*, un strat subţire de germaniu *p*. Cînd emiterului i se aplică, în sensul de trecere, un impuls de tensiune izolat, sub acţiunea cîmpului electric al impulsului, golurile trec din germaniul *p* în germaniul *n*. În literatura de specialitate acest fenomen a căpătat denumirea de injectare a purtătorilor de curent. Golurile injectate în germaniul *n* rătăcesc liber prin volumul acestuia pentru un interval de timp foarte scurt, de ordinul cîtorva miimi de secundă. După acest „timp de viaţă", purtătorii de curent în minoritate (golurile) din germaniul electronic, sub acţiunea cîmpului colectorului, reuşesc să ajungă în zona joncţiunii *p—n* a colectorului, ceea ce duce la o creştere considerabilă a conductibilităţii acestuia. Dacă înainte de aplicarea impulsului de tensiune rezistenţa joncţiunii *p—n*, în sensul de blocare, era mică, după ce în zona acestei joncţiuni pătrund golurile injectate de emiter, rezistenţa joncţiunii scade puternic. Ca rezultat, tensiunea bateriei conectate în circuitul colectorului se redistribuie în aşa fel, încît cea mai mare parte a ei revine rezistenţei de sarcină, de la care este apoi preluată.

Fenomenele care se petrec într-un tranzistor atunci cînd la emiter se aplică un impuls de tensiune izolat condiţionează amplificarea de curent, de tensiune sau de putere a semnalului. Este cît se poate de evident că natura acestor procese rămîne aceeaşi şi în cazul cînd emiterului i se va aplica nu un singur impuls, ci mai multe impulsuri care se succed unul după altul, sau o tensiune sinusoidală alternativă. În ultimul caz, în afară de semnalele care urmează a fi amplificate, emiterului i se aplică şi o polarizare continuă. În fig. 28 este reprezentat aspectul exterior al unui tranzistor cu joncţiune.

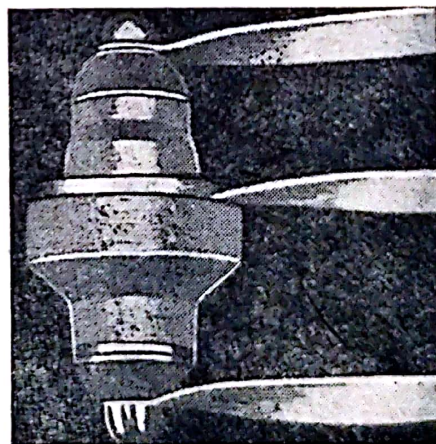


Fig. 28 Aspectul exterior al unui tranzistor cu germaniu cu joncţiune

Crearea diodelor semiconductoare şi a tranzistoarelor a constituit o mare victorie a gîndirii

fizice, oferind vaste şi noi posibilităţi şi perspective pentru radiotehnică. În comparaţie cu predecesoarele lor, tuburile electronice cu vid, diodele semiconductoare şi tranzistoarele posedă o serie întreagă de avantaje inapreciabile. Ele au dimensiuni reduse, de cîteva ori mai mici decît acelea ale tuburilor electronice. Durata lor de serviciu este considerabil mai lungă decît durata de serviciu a tuburilor. Ele au un randament ridicat, care ajunge pînă la 50% în cazul unui tranzistor, în timp ce randamentul unui tub electronic amplificator este mult mai mic. Diodele semiconductoare şi tranzistoarele nu au circuite de încălzire şi posedă o serie întreagă de alte avantaje extrem de importante. Toate acestea le fac să fie dispozitive excepţional de preţioase, iar în numeroase cazuri — de neînlocuit. Se pot da multe exemple care ilustrează această afirmaţie. Este suficient să spunem că în prezent se construiesc radioreceptoare ale căror dimensiuni depăşesc numai cu puţin dimensiunile unei cutii de chibrituri. În aceste aparate, în locul tuburilor electronice se găsesc diode şi tranzistoare de germaniu.

Pentru alimentarea lor, receptoarele şi emiţătoarele de acest fel necesită cantităţi foarte mici de energie electrică. Această împrejurare are adesea o importanţă deosebit de mare. Aparatajul de dimensiuni mici poate fi pus în buzunar împreună cu bateriile de alimentare uscate. Posedînd o greutate mică el este de neînlocuit în campanie, expediţii, excursii turistice etc. Folosirea lor la staţiile de maşini şi tractoare, pentru comunicaţiile între brigăzile de pe cîmp, va permite economisirea unei mari cantităţi de energie electrică şi va permite să se renunţe la acumulatoarele deficitare. Datorită greutăţii mici, radioaparatajul de dimensiuni reduse prezintă un interes excepţional pentru avioane, unde are importanţă fiecare kilogram de greutate în plus. În fig. 29 este arătat aspectul exterior al unui receptor de acest fel, montat pe ghidonul unei motociclete uşoare. El are dimensiuni relativ mari numai din cauza faptului că în aceeaşi cutie sînt amplasate nu numai receptorul cu un difuzor destul de puternic, dar şi bateriile uscate.

Rezistenţa mecanică mare a diodelor şi tranzistoarelor de germaniu permite ca toate instalaţiile radiotehnice posibile să funcţioneze în condiţii de trepidaţii, vibraţii, şocuri, în general acolo unde tuburile electronice nu pot fi folosite.

În ultimii ani, s-au răspîndit pe scară largă maşinile de calculat electronice. Ele sînt folosite cu succes în institutele

de cercetări științifice, în birourile de proiectare și construcție, în diferite organizații care se ocupă cu efectuarea calculelor și în alte instituții. Fiecare mașină conține, în circuitul ei, cîteva mii de tuburi electronice, care ies relativ des din funcțiune și deranjează astfel ritmul de lucru impus. Acesta este

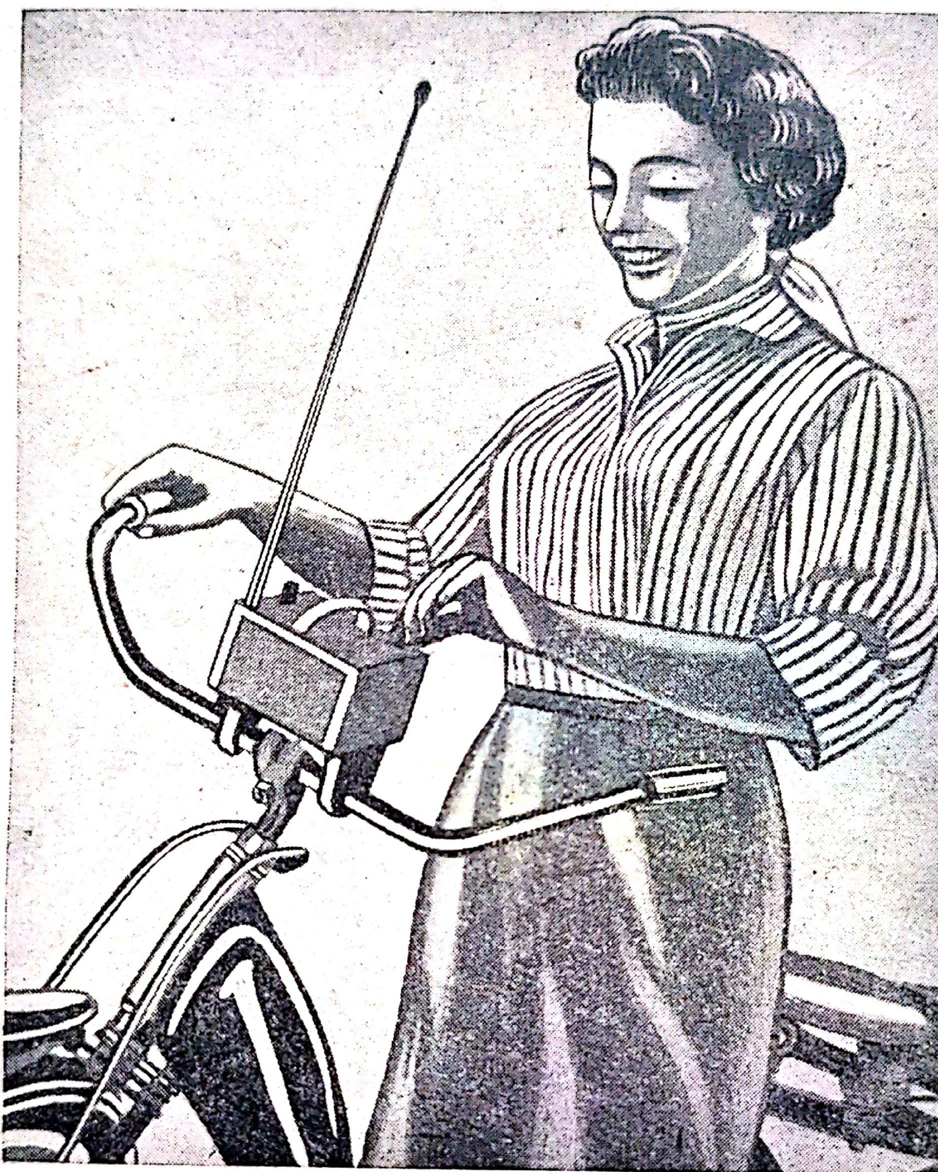


Fig. 29. Receptor cu diode și tranzistoare cu germaniu, montat pe ghidonul unei motociclete ușoare

un dezavantaj serios, dar în această privință nu se poate face de fapt nimic. O dată cu apariția elementelor de germaniu, situația s-a schimbat radical: în locul tuburilor electronice au început să se folosească diode și tranzistoare cu germaniu

și eficacitatea mașinilor de calculat s-a mărit simțitor, în timp ce costul exploatării lor și dimensiunile s-au micșorat.

Recent, s-a reușit să se construiască un radioemițător miniatură cu tranzistoare, care nu necesită nici un fel de alimentare electrică specială. Aceasta este înlocuită cu energia sonoră a vocii omenești. Microfonul acestui emițător transformă vibrațiile sonore în energie electrică, care este întrutotul suficientă pentru punerea în funcțiune a emițătorului.

Pe la mijlocul anului 1955 a intrat în funcțiune prima centrală telefonică cu 3 000 numere, în care toate tuburile electronice au fost înlocuite cu tranzistoare. Această schimbare a făcut ca viteza de comutare a numerelor să se mărească considerabil.

Am dat doar cîteva exemple de aplicații ale diodelor și tranzistoarelor, însă chiar și aceste exemple, după cîte ni se pare nouă, sînt mai mult decît suficiente pentru a înțelege ce importanță mare capătă în timpurile noastre aceste remarcabile dispozitive semiconductoare.

8. FOTOREZISTENȚELE

Proprietatea substanțelor semiconductoare de a-și micșora rezistența sub acțiunea luminii absorbite a fost folosită de fizicieni pentru crearea unor dispozitive numite fotorezistențe. Fotorezistența este construită în modul următor. Pe o plăcuță izolantă dintr-un material oarecare se depune un strat subțire de substanță semiconductoare fotosensibilă. Pe marginile stratului se așază niște electrozi metalici. Între electrozi rămîne suprafața liberă a stratului de semiconductor, supusă acțiunii radiațiilor luminoase (fig. 30).

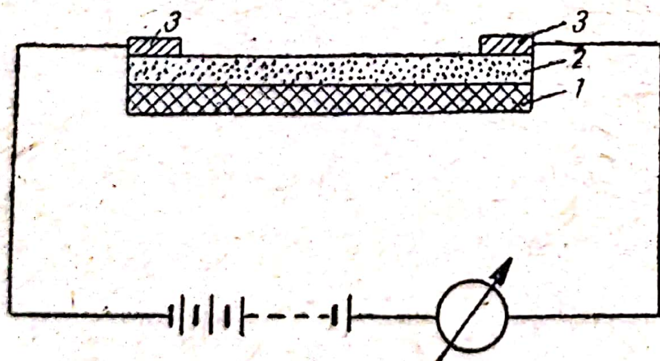


Fig. 30. Construcția schematică a unei fotorezistențe:
1 — suport izolant, 2 — stra semiconductor, 3 — electrozi

Fotorezistența este conectată într-un circuit cu sursă de tensiune și galvanometru. În majoritatea cazurilor, în locul galvanometrului se montează un releu electromagnetic. Cînd fotorezistența se află în obscuritate, prin circuit trece un curent destul de slab.

Este însă suficient ca ea să fie supusă acțiunii unei radiații corespunzătoare, pentru ca în circuit să se mărească aproape instantaneu intensitatea curentului, fapt ce va fi indicat de galvanometru sau de releu, care anclanșează rapid.

Diversele substanțe semiconductoare posedă proprietăți fotoelectrice diferite. Unele reacționează în special la lumina verde, altele la lumina roșie, altele la lumina albastră etc. Există semiconductoare care sînt foarte sensibile la radiațiile infraroșii. De aceea, orice fotorezistență prezintă o anumită sensibilitate spectrală, adică o variație a curentului fotoelectric în funcție de frecvența radiației. Această împrejurare extinde încă și mai mult domeniul aplicațiilor practice ale semiconductoarelor. În Uniunea Sovietică, cele mai răspîndite sînt fotorezistențele confecționate din sulfură de plumb, sulfură de bismut și sulfură de cadmiu. În fig. 31 este reprezentat aspectul exterior al unei fotorezistențe din monocristal de sulfură de cadmiu.

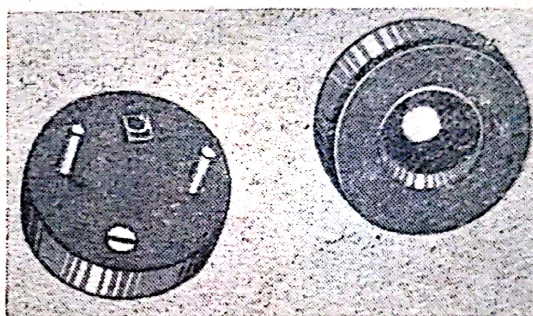


Fig. 31 Aspectul exterior al unei fotorezistențe din monocristal de carbură de siliciu

Fotorezistențele sînt folosite într-un mare număr de instalații automate și aparate diverse, aproape peste tot unde se utilizează fotoelemente, la a căror descriere vom trece acum.

9. CELULE FOTOELECTRICE GENERATOARE

De istoria celulei fotoelectrice semiconductoare sînt legate probleme tehnice interesante, inclusiv problema transformării directe a energiei solare în energie electrică, pe care oamenii de știință, tehnicienii și inventatorii s-au străduit mulți ani să o rezolve. Numeroase proiecte au intrat în arhiva științei, fără a mai fi de loc perfecționate, și această problemă a rămas nerezolvată pînă în secolul XX. Pînă la începutul deceniului al patrulea al veacului nostru, în acest domeniu nu au avut loc nici un fel de progrese însemnate, deși fuseseră create diferite tipuri de instalații solare. Ele erau însă voluminoase, incomode în exploatare, necesitau o întreținere permanentă și, ceea ce era mai important, aveau un randament scăzut.

Situaţia a început să se schimbe numai după ce, acum 25 de ani, academicianul A. P. Ioffe a arătat cu convingere şi cu îndrăzneală că inventatorii nu mergeau pe calea cea bună şi că soluţia corectă consta în crearea, pentru acest scop, a unei celule fotoelectrice semiconductoare cu randament ridicat. A. P. Ioffe credea cu tărie că o celulă fotoelectrică de acest fel poate fi creată şi că este necesar să se lucreze în această direcţie. În acea perioadă aproape nimeni nu credea în posibilitatea de realizare practică a unor asemenea idei.

De pe vremea acestor previziuni au trecut aproximativ 25 ani. Fizicienii nu au irosit în zadar această perioadă de timp şi au înregistrat o serie întreagă de victorii strălucite. Una dintre aceste victorii, fără îndoială, trebuie considerată crearea unei noi celule fotoelectrice semiconductoare, cu randamentul de 10%.

Celula fotoelectrică semiconductoare sau, cum mai este numită uneori, generatoare este un dispozitiv care transformă energia radiantă direct în energie electrică.

Există relativ multe tipuri de celule fotoelectrice, însă — în ce priveşte principiul de funcţionare — ele se împart în numai două clase. Din prima fac parte toate tipurile de celule fotoelectrice bazate pe efectul fotoelectric exterior. Din a doua clasă fac parte celulele fotoelectrice semiconductoare cu strat de blocare, numite altfel şi generatoare, care se disting deosebit de avantajos de toate celelalte tipuri de dispozitive fotoelectrice prin faptul că sub acţiunea radiaţiei ele produc o forţă electromotoare proprie, adesea egală cu cîteva zecimi de volt în cazul expunerii directe la lumina solară.

Pentru a ne imagina mai clar importanţa acestui fapt, vom recurge la compararea efectului fotoelectric exterior şi celui interior. Primul se află la baza construcţiei tuburilor fotoelectrice cu vid sau umplute cu gaz, cel de al doilea — la baza fotorezistenţelor. Pentru obţinerea unor curenţi electrici cît de cît perceptibili în tuburile fotoelectrice cu efect fotoelectric exterior, nu este însă suficientă numai acţiunea luminii. În afară de ea, este necesar ca între fotocatod şi anod să se creeze un cîmp electric de valoarea necesară, care să asigure captarea de către anod a tuturor electronilor emişi. De aceea, aceste tuburi fotoelectrice funcţionează în regimuri care prevăd conectarea obligatorie, în circuitul electric al tubului, a unei surse de tensiune continuă — o baterie uscată sau un acumulator. Fără sursă de tensiune tuburile fotoelec-

trice cu vid şi cu gaz nu pot funcţiona şi, în consecinţă, se transformă în aparate absolut inutile.

O situaţie analogă există şi în cazul fotorezistenţelor; aici, sub acţiunea luminii absorbite, apar electroni de conducţie care nu zboară în exterior ca în cazul precedent, ci rămîn chiar în stratul semiconductor. Electronii şi golurile eliberate de lumină capătă posibilitatea de a se deplasa haotic în întreaga masă a substanţei; cu toate acestea, nu se va observa nici un fel de curent. Pentru ca într-o fotorezistenţă să apară curentul fotoelectric, este necesar de asemenea să se recurgă la o sursă exterioară de energie electrică, conectînd în acest scop o bornă a fotorezistenţei la polul pozitiv al unei baterii, iar cealaltă bornă — la polul negativ.

Necesitatea folosirii unei surse exterioare de tensiune se explică prin faptul că nici celulele fotoelectrice cu efect fotoelectric exterior, nici fotorezistenţele, nu produc forţe electromotoare proprii sub acţiunea radiaţiilor incidente. Radiaţiile eliberează electroni, însă aceştia pot fi utilizaţi ulterior numai cu participarea unei surse de tensiune continuă.

Cu totul altceva se observă în cazul efectului fotoelectric al stratului de blocare. Dacă se alcătuieşte un circuit închis, format dintr-o celulă fotoelectrică generatoare şi un galvanometru şi apoi se va îndrepta un flux de lumină spre suprafaţa fotosensibilă a celulei, prin circuit va trece un curent electric. Producînd, sub acţiunea radiaţiilor, o forţă electromotoare proprie, celulele fotoelectrice generatoare permit în felul acesta să se realizeze transformarea directă a energiei radiante în energie electrică. În consecinţă, ele reprezintă — în esenţă — nişte centrale electrice miniatură, în care drept „combustibil“ se foloseşte energia radiantă absorbită. În aceasta constă deosebirea principală dintre celulele fotoelectrice semiconductoare şi alte dispozitive fotoelectrice.

În principiu, orice celulă fotoelectrică generatoare reprezintă un sistem format dintr-o plăcuţă-suport metalic, un strat subţire de semiconductor şi un electrod metalic superior, semitransparent. Tehnologia confecţionării celulei fotoelectrice este alcătuită în aşa fel, încît se obţine un strat semiconductor neuniform în ce priveşte proprietăţile lui electrice. O parte a lui, care vine în contact direct cu electrodul interior (baza), capătă un anumit tip de conducţie, de exemplu prin goluri, iar cealaltă parte — care aderă la electrodul superior (adică la stratul de metal subţire, semitransparent) — dobîndeşte un tip de conducţie opus (electronic). Între aceste

straturi se găseşte stratul de baraj. Va să zică, celula fotoelectrică generatoare, sau cum mai este numită „celula fotoelectrică cu strat de blocare", constituie un sistem compus dintr-un electrod metalic inferior, un semiconductor cu două regiuni, una cu goluri şi alta cu electroni, stratul de baraj cuprins între ele şi un electrod semitransparent superior (fig. 32).

Întreg acest sistem este introdus într-o montură de masă plastică, prevăzută cu o ferestruică şi două borne, la care se leagă conductoarele de la electrodul inferior şi cel superior ai celulei fotoelectrice (fig. 33).

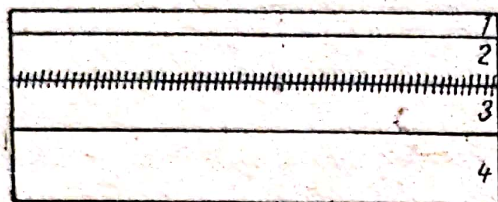


Fig. 32. Structura schematică a unei celule fotoelectrice cu strat de blocare (generatoare);

1 — electrod semitrsnsparent superior, *2* — semiconductor electronic, *3* — semiconductor cu goluri, *4* — electrod metalic inferior. Domeniul haşurat reprezintă stratul de blocare

Cînd pe electrodul superior al celulei fotoelectrice cade un flux de lumină, o parte din acesta este reflectat de stratul metalic, o altă parte este absorbită în grosimea acestui strat şi, în fine, partea care rămîne trece prin strat şi este absorbită de regiunea semiconductorului. Aceasta duce la eliberarea de electroni şi goluri, proces despre care s-a vorbit amănunţit în capitolul I al acestei cărţi. Ca rezultat al deplasării golurilor spre un electrod şi a electronilor spre celălalt, electrozii se încarcă cu electricitate de semne opuse şi între ei apare o diferenţă de potenţial a cărei valoare, pînă la o anumită limită, va fi cu atît mai mare, cu cît intensitatea fluxului luminos este mai mare. Dacă între bornele celulei fotoelectrice se leagă un conductor oarecare, formîndu-se astfel un circuit închis, prin acesta va circula un curent atîta timp cît celula fotoelectrică primeşte fluxul de lumină.

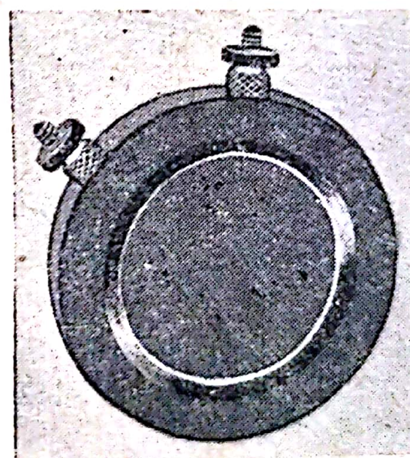


Fig. 33. Aspectul exterior al unei celule fotoelectrice generatoare tipice

Pentru fiecare celulă fotoelectrică au o importanţă esenţială factori ca stabilitatea proprietăţilor fotoelectrice în timp, caracteristicile de frecvenţă şi de lumină, sensibilitatea integrală şi cea spectrală. Sensibilitatea integrală a unei celule fotoelectrice este o mărime fizică importantă. Ea caracteri-

zează capacitatea de transformare a celulei şi este numeric egală cu intensitatea fotocurentului care apare în circuitul închis al celulei fotoelectrice, atunci cînd pe aceasta cade un flux de lumină egal cu unitatea. In mod obişnuit, pentru partea vizibilă a spectrului, sensibilitatea integrală se măsoară în microamperi pe lumen. Sensibilitatea spectrală a celulei fotoelectrice caracterizează intensitatea fotocurentului care apare sub acţiunea luminii de o lungime de undă strict determinată. Deoarece orice celulă fotoelectrică „simte“, de regulă, o porţiune relativ largă a spectrului, caracteristica spectrală a fiecărei celule fotoelectrice este reprezentată sub forma unui grafic. Dacă pe axa ordonatelor se notează sensibilitatea, iar pe axa absciselor — lungimea de undă, caracteristica spectrală a celulei fotoelectrice va fi reprezentată printr-o linie curbă (fig. 34).

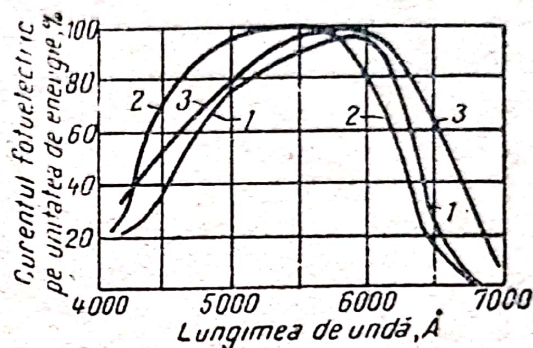


Fig. 34. Caracteristicile spectrale ale unei celule fotoelectrice de seleniu. Curbele *1, 2* şi *3* se referă la seleniu cu diferite adaosuri

Cea dintîi celulă fotoelectrică generatoare (celulă fotovoltaică) a fost făcută din oxid cupros. Curînd, însă ea a încetat de a mai fi folosită, deoarece au fost create celule fotoelectrice generatoare mult mai perfecţionate, la început din seleniu, apoi din sulfură de taliu, sulfură de argint şi germaniu. Dar chiar şi aceste minunate celule fotoelectrice, cu toate proprietăţile lor remarcabile, n-au putut pretinde rolul de transformator — avantajos din punct de vedere economic — al energiei solare în energie electrică. La drept vorbind, inventatorii lor nici măcar nu şi-au propus un asemenea scop, ci au rezervat celulelor fotoelectrice generatoare un rol cu totul diferit — acela de indicator sensibil la lumină. Indeplinind aceste funcţiuni, ele au căpătat o răspîndire foarte largă. In timpurile noastre, celula fotoelectrică a devenit unul dintre dispozitivele cele mai răspîndite, mai importante şi totodată de neînlocuit. Datorită introducerii ei pe scară largă în tehnică, a devenit posibil cinematograful sonor, a devenit nepericuloasă munca lucrătorilor, s-au automatizat multe procese de producţie, a devenit o realitate transmiterea la mari distanţe a imaginilor şi telegramelor, s-a înfăptuit televiziunea, s-au extins considerabil posibilităţile vizuale ale

ochiului omenesc, capabil acum de a vedea în întuneric deplin cu ajutorul unor traductoare electrono-optice etc.

În multe operații importante de producție, celula fotoelectrică a înlocuit omul. În industria metalurgică ea comandă motoarele laminoarelor, controlează calitatea pieselor turnate și participă la o serie întreagă de alte cicluri tehnologice. Cu ajutorul celulelor fotoelectrice se realizează controlul sigur al unui mare număr de operații de producție. Celulele fotoelectrice îndeplinesc nenumărate funcțiuni : sortează toate felurile posibile de piese, rebutează produsele care nu sînt de calitate bună, reglează mișcarea mijloacelor de transport, asigură arderea corectă a combustibilului, reglează temperatura cuptoarelor, conectează automat iluminatul străzilor și aprind luminile geamandurilor, înlocuiesc portarii, păzesc neobosite și cu vigilență, cheamă infirmiera la un bolnav grav, semnalizează începutul unui incendiu, evită accidentele în transportul feroviar etc.

Introducerea în economia națională sovietică a diferitelor instalații fotoelectrice perfecționează tehnica sovietică și o ridică la un nivel mai înalt

Tot atît de mult se folosesc celulele fotoelectrice și în practica științifică. Folosirea aparatelor și circuitelor fotoelectrice în laborator se dovedește excepțional de eficace. Cele mai importante probleme metodice, înainte dificil de rezolvat, capătă — cu ajutorul instalațiilor fotoelectrice — o soluție rapidă și simplă. Multe probleme științifice se dovedesc rezolvabile sau capătă un impuls pentru dezvoltarea ulterioară datorită utilizării metodelor de cercetare fotoelectrică. Există ramuri întregi ale științei, în care celulele fotoelectrice s-au dovedit un instrument de neînlocuit pentru studiul noilor fenomene din natură. Folosirea fotometrelor cu celule fotoelectrice, a multiplicatoarelor electronice care se bazează pe principiul amplificării fotocurentului datorită emisiei secundare de electroni, a contoarelor de fotoni și a altor dispozitive fotoelectrice sensibile, a permis ca în ultimii ani să se obțină noi date despre procesele nucleare, despre luminescența straturilor superioare ale atmosferei, despre dispersia luminii de către molecule, despre structura galaxiei și o serie întreagă de alte probleme.

Introducerea pe scară largă a metodelor fotoelectrice în cercetările științifice și în producție, în tehnica transporturilor, a telecomunicațiilor și a construcțiilor, folosirea celulelor fotoelectrice în cinematografie și televiziune a dus la in-

tensificarea lucrărilor ştiinţifice în domeniul fotoelectronicii. Succesele ei, condiţionate pe de o parte de dezvoltarea vertiginoasă a tehnicii şi de noile cerinţe care apar în cursul acestui proces, iar pe de altă parte, de către dezvoltarea şi aprofundarea cunoştinţelor ştiinţifice, au dus la o folosire pe scară neobişnuit de largă a celulelor fotoelectrice.

În toate circuitele fotoelectrice se folosesc două proprietăţi ale celulei fotoelectrice: variaţia fotocurentului în funcţie de intensitatea fluxului luminos şi, în general, apariţia curentului datorită acţiunii luminii. Dispozitivele fotoelectrice permit să se realizeze: conectarea aparatelor, automatelor, maşinilor, reglarea desfăşurării unor diferite procese, măsurarea unor diverse mărimi fizice, înregistrarea unor anumite fenomene, redarea sunetelor, transmiterea imaginilor etc.

În funcţie de destinaţie, în circuitul cu celulă fotoelectrică se introduce sau un galvanometru, sau un releu electromagnetic, sau orice alt aparat. Pentru multe scopuri practice, dispozitivul fotoelectric conţine, în afară de celula fotoelectrică, şi un releu electromagnetic. Un asemenea dispozitiv, uneori în combinaţie cu un amplificator de fotocurenţi, se numeşte releu fotoelectric. In principiu, el funcţionează în modul următor: cînd celula fotoelectrică este iluminată, în circuitul ei apare un curent care provoacă anclanşarea releului electromagnetic. Acesta din urmă este întotdeauna legat de un circuit oarecare, ce trebuie închis sau deschis. Acest circuit serveşte la pornirea sau, dimpotrică, la oprirea unui aparat oarecare. Simplitatea construcţiei releelor fotoelectrice cu semiconductori şi siguranţa lor de funcţionare permit ca ele să aibă numeroase aplicaţii în cele mai diverse domenii

Celulele fotoelectrice sînt mult utilizate pentru evitarea accidentelor. Un loc periculos, de exemplu spaţiul de lucru al unei prese mecanice, este traversat de o rază luminoasă care ajunge la un releu fotoelectric aşezat lateral. Atîta timp cît celula fotoelectrică este iluminată, prin circuitul releului fotoelectric trece continuu un curent şi armătura este atrasă miezul de fier al releului electromagnetic. Cînd iluminarea se întrerupe, curentul încetează de a mai circula, armătura se desprinde de miezul de fier şi închide un circuit exterior, care pune în funcţiune o instalaţie de frînare ce opreşte presa extrem de repede.

Dispozitivele fotoelectrice care protejează muncitorul împotriva accidentelor şi care au căpătat deja o largă răspîndire se bazează pe diferite soluţii constructive determinate de

operația tehnologică concretă căreia îi sînt destinate aceste dispozitive. Se ține seama nu numai de particularitățile mașinilor cu care trebuie să aibă de-a face muncitorul, dar și de particularitățile mișcărilor muncitorului însuși. În unele cazuri este expusă pericolului mîna muncitorului, în altele întregul braț și chiar umărul, iar în altele — corpul muncitorului. În fiecare caz concret de acest fel, automatica fotoelectrică protejează muncitorul împotriva accidentelor.

Cu același succes se folosește automatica fotoelectrică pentru protecția oamenilor care lucrează la tensiuni înalte. Există multe instalații de acest fel: fiecare dintre ele rezolvă problema blocării ținînd seamă de specificul respectiv și se bazează pe principiul întreruperii unei raze de lumină.

În fabrici și uzine, unde se confecționează piese standard în mare cantitate, apare necesitatea de a se ține evidența numărului lor. Există cazuri în care numărarea pieselor nu poate fi efectuată cu contoare mecanice cu contacte. Aceasta se referă, de exemplu, la toate piesele metalice incandescente, care tocmai au trecut printr-o operație de ștanțare sau laminare. Contorul fotoelectric automat modern numără cu aceeași precizie orice obiecte: și mari și mici și reci și calde. În afară de aceasta, numărarea pe cale fotoelectrică a produselor poate fi combinată cu sortarea lor. Principiul construcției unui asemenea dispozitiv este foarte simplu. De o parte a unei benzi transportoare se amplasează o lampă cu lentilă, iar de cealaltă — un releu fotoelectric. Fasciculul luminos îngust este întrerupt de piesele care se deplasează pe transportor. Releul fotoelectric pune în funcțiune un contor electric cu funcționare rapidă și acesta numără piesele ce se deplasează. Prin acest procedeu se numără, în unele fabrici, porțiile de înghețată, bucățile de săpun, cutiile de chibrituri etc.

În multe uzine, cîntarele sînt folosite nu numai pentru cîntărirea pieselor finite, dar și pentru scopuri de control. Astfel, de exemplu, în funcție de greutate se pot rebuta piesele care nu se încadrează în toleranțe. Cîntarele pot servi și la sortarea produselor care se deosebesc unul de altul numai prin greutatea lor. Pentru accelerarea procesului de rebutare, sortare sau cîntărire, este rațional ca în unele cazuri să se folosească circuite fotoelectrice. Firește, există multe asemenea circuite și tot atît de multe pot fi imaginate și de acum încolo. Ca exemplu vom considera unul dintre aceste circuite, care servește la cîntărirea cimentului într-o fabrică de ciment.

Raza de lumină este îndreptată în aşa fel spre fotoreleu, încît atunci cînd se ajunge la echilibru, pîrghia cîntarului se pune în mişcare şi întrerupe fasciculul luminos. Releul fotoelectric anclanşează şi pune în funcţiune un mecanism care întrerupe turnarea cimentului pe platan.

Alte circuite de cîntărire automată sînt alcătuite conform aceluiaşi principiu — întreruperea fasciculului luminos de către o parte mobilă oarecare a cîntarului : pirghia, platanul, acul indicator etc. În principiu, se poate realiza un circuit fotoelectric care să dea posibilitatea efectuării cîntăririi cu un mare grad de precizie. Este convenabil şi faptul că pentru cîntărirea automată folosind relee fotoelectrice nu este necesar contactul direct al aparatului de reglare cu cîntarul însuşi. În plus, celula fotoelectrică permite să se realizeze controlul şi orice operaţie automată de la un punct îndepărtat, legat de locul de producţie numai prin fire.

Acum cîţiva ani, chiar şi cele mai puternice laminoare funcţionau fără automatică fotoelectrică. Celula fotoelectrică, folosită în multe ramuri ale industriei, a început să-şi găsească aplicaţii şi în industria metalurgică, în special la fabricarea laminatelor metalice. Cu ajutorul unui releu fotoelectric, valţurile laminorului încep să se rotească în sens invers în momentul necesar. Un sistem automat de acest fel are o construcţie principial simplă. De o parte a valţurilor se găseşte sursa de lumină care trimite un fascicul luminos aproape paralel, iar de cealaltă — releul fotoelectric. Cînd piesa care urmează a fi laminată, o grindă, o şină sau oricare altă piesă, intersectează fasciculul luminos, releul fotoelectric anclanşează şi conectează mecanismul care provoacă rotirea în sens invers a valţurilor.

Pentru verificarea de control a calităţii produselor se folosesc adesea aparate fotoelectrice speciale, construite în aşa fel încît să permită determinarea stării unei piese ţinînd seama de un parametru oarecare al ei : duritatea, culoarea, dimensiunile etc. Iată cum, de exemplu, se rebutează cu ajutorul unei celule fotoelectrice — în funcţie de duritate — bolţurile pistoanelor pentru motoarele cu ardere internă. Cînd bolţul se deplasează pe banda transportorului, pe el cade un ciocănaş care în urma ciocnirii sare în sus. Dacă bolţul corespunde normei în ce priveşte duritatea, ciocănaşul sare pînă la o anumită înălţime şi intersectează raza de lumină a releului fotoelectric. Întreruperea razei de lumină provoacă anclanşarea rapidă a unui releu ce pune în funcţiune un

mecanism care împinge bolțul mai departe pe banda transportoare. Dacă duritatea bolțului este mai mică decît cea prescrisă, ciocănașul — după ciocnire — nu sare atît de mult încît să ajungă pînă la raza de lumină. În acest caz nu are loc întreruperea razei și anclanșarea releului și, cu ajutorul unui dispozitiv special, bolțul rebutat va fi aruncat într-o cutie. Un asemenea automat sortează pînă la 2 000 bolțuri pe oră.

Adesea, în tipografii au loc întreruperi forțate ale unei mașini rotative. Aceasta se întîmplă deoarece banda de hîrtie care iese din mașină se rupe. Ruperea benzii duce, în primul rînd, la rebuturi, iar în al doilea rînd, constituie cauza opririi întregului agregat. Pentru evitarea opririi de lungă durată a mașinii, se folosește un dispozitiv fotoelectric. Schema acestui dispozitiv este următoarea. La ambele margini ale benzii care se deplasează se montează relee fotoelectrice. Sub ele, adică de partea cealaltă a benzii, se așază sursele de lumină. De îndată ce începe ruperea benzii de hîrtie, și această rupere, de regulă, începe de obicei de la margine, releul fotoelectric anclanșează și mașina se oprește. Un asemenea automat de oprire, cu fotorezistențe ФС-К1 și ФС-К2 a fost construit de un grup de inginrei și tehnicieni de la tipografia „Peceatnîi Dvor“ din Leningrad, și este folosit cu succes acolo.

Cu ajutorul unei instalații fotoelectrice se realizează verificarea tablelor metalice, pentru a se descoperi dacă în ele există orificii și fisuri mici. Pe o parte a tablei se deplasează fasciculul de lumină, iar pe cealaltă parte — sincron cu raza — se deplasează o celulă fotoelectrică. Raza împreună cu celula fotoelectrică explorează întreaga suprafață a tablei. Cînd se întîlnește un orificiu sau o fisură, se conectează o instalație de semnalizare și, simultan, deplasarea razei și a celulei fotoelectrice se întrerupe.

Există mai multe procedee care dau posibilitatea să se mențină automat, cu un mare grad de precizie, un nivel constant al lichidului dintr-un rezervor, folosind în acest scop un releu fotoelectric. O instalație de acest fel este realizată în modul următor. Pe doi pereți opuși ai rezervorului, la înălțimea nivelului la care trebuie să se găsească lichidul, se fac două ferestruici mici de sticlă. Printr-o ferestruică se trimite un fascicul de lumină, iar în dreptul celei de-a doua ferestruici se montează o celulă fotoelectrică conectată la circuitul amplificator al releului fotoelectric. Pe suprafața lichi-

dului din rezervor se găseşte un plutitor. Cu ajutorul unui dispozitiv simplu, plutitorul se menţine întotdeauna la mijlocul suprafeţei lichidului. Pe măsură ce se consumă lichid. plutitorul coboară din ce în ce mai jos. În fine, plutitorul se va coborî pînă la nivelul fluxului de lumină, care merge de la o ferestruică la alta, ceea ce provoacă anclanşarea releului fotoelectric. Acesta pune în funcţiune un mecanism ce deschide robinetul prin care rezervorul va fi din nou umplut cu lichid. Creşterea nivelului lichidului peste marginea superioară a fluxului luminos închide automat robinetul. Întreg acest sistem poate fi reglat foarte precis. Evident, cu cît lăţimea fluxului luminos este mai mică, cu atît se reglează mai precis înălţimea dată a nivelului lichidului. O instalaţie analogă se foloseşte şi pentru controlul şi semnalizarea înălţimii nivelului de umplere a vanelor, buncărelor, lăzilor cu materiale friabile etc. În acest caz nu este necesar un plutitor. Raza de lumină este întreruptă de însăşi masa substanţei friabile: nisip, cărbune, grîne, făină etc.

Adesea, releele fotoelectrice se folosesc pentru deschiderea automată a uşilor. Raza de lumină care pleacă de la o lampă aşezată în faţa uşilor este întreruptă de persoana care intră. Releul fotoelectric anclanşează şi închide un circuit electric ce pune în mişcare un motor care deschide repede uşa.

Exemplele date, referitoare la aplicaţiile celulelor fotoelectrice, ilustrează principiul funcţionării lor, bazat pe faptul că fasciculul luminos este întrerupt — la momentul necesar — dintr-o cauză oarecare. Vom da acum cîteva exemple de funcţionare a circuitelor fotoelectrice bazate pe utilizarea variaţiei curentului fotoelectric în funcţie de intensitatea luminii incidente la celula fotoelectrică.

Adesea apare necesitatea de a se determina transparenţa unei substanţe în stare lichidă, gazoasă şi chiar solidă. În acest scop se foloseşte un aparat special, care măsoară gradul de opalescenţă (nefelometrul). Principiul de funcţionare al nefelometrului cu obiectiv şi celulă fotoelectrică este extrem de simplu. Razele emise de o sursă de lumină trec printr-o lentilă şi prin vasul care conţine substanţa ce urmează a fi încercată, apoi fluxul de lumină paralel ajunge la o celulă fotoelectrică conectată într-un circuit. După ce se măsoară valoarea curentului fotoelectric, se dă vasul la o parte şi atunci fasciculul luminos cade direct pe celula fotoelectrică, producînd un curent mai intens. Raportul fotocurenţilor dă

tocmai valoarea transparenței, exprimată în unități relative. Este necesar numai să se introducă o corecție pentru acea parte din cantitatea de lumină, care este reflectată la trecerea dintr-un mediu în altul, din aer în soluție și invers, și să se țină seamă de absorbția în vasul însuși.

Celulele fotoelectrice sînt folosite tot atît de mult și în domeniul fotometriei. Variația direct proporțională a fotocurentului în funcție de intensitatea luminii incidente, care se observă la unele celule fotoelectrice, face ca ele să fie excepțional de prețioase pentru acest scop. Încă de mult, în locul fotometrelor obișnuite au început să se folosească dispozitive fotoelectrice. Cu ajutorul lor se determină intensitatea luminii diferitelor surse și se apreciază foarte precis iluminarea dată de lumina zilei.

Pentru măsurarea iluminării în funcție de timpul zilei și de condițiile meteorologice s-au creat diferite tipuri de fotometre înregistratoare obiective, cu celule fotoelectrice. Cele mai bune aparate sînt construite în așa fel, încît pe un cilindru rotitor — pe care se fixează o hîrtie — se trasează automat curba variației iluminării în funcție de timp. Adesea, în locul unei foi albe de hîrtie liniată, pe cilindru se fixează hîrtie fotosensibilă și pata luminoasă trimisă de oglinda galvanometrului „desenează" pe ea o curbă.

Trebuie să se țină seama că pentru fotometrarea luminii zilei este necesar să se folosească celule fotoelectrice a căror sensibilitate spectrală coincide cu curba de sensibilitate a ochiului.

Prin intermediul celulelor fotoelectrice se fotometrează nu numai stele de prima mărime, dar și stelele de mărimea a șasea. Celulele fotoelectrice sensibile la radiațiile ultraviolete ale spectrului sînt folosite pentru fotometrarea surselor de radiații ultraviolete.

În fizioterapie, drept mijloc terapeutic se folosește adesea iradierea cu raze ultraviolete a organului bolnav. Aici are un rol esențial dozarea radiațiilor; o intensitate prea mare este periculoasă. Cu ajutorul unei celule fotoelectrice se poate regla extrem de precis doza de radiații ultraviolete.

Fotografii folosesc deseori un exponometru. Exponometrul este un aparat format dintr-o celulă fotoelectrică și un milivoltmetru sensibil cu ac indicator, montate într-o cutie comună. În timpul expunerii, suprafața celulei fotoelectrice este îndreptată spre obiectul ce urmează a fi fotografiat. Cu cît este mai mare cantitatea de lumină care cade pe celula foto-

electrică, cu atît acul galvanometrului va devia mai mult din poziţia de zero.

În funcţie de ora zilei, de starea norilor şi de alte condiţii, iluminarea obiectului va varia, devenind cînd mai mare, cînd mai mică. În conformitate cu variaţiile iluminării se vor schimba şi indicaţiile milivoltmetrului exponometrului. Acesta din urmă va indica chiar şi variaţii neînsemnate ale iluminării şi acul galvanometrului se va opri în dreptul cifrei de pe scală care indică precis timpul expunerii.

Pe rîurile navigabile, pentru notarea liniei de navigabilitate pe toată lungimea, la distanţe egale se aşază geamanduri. Pe vîrful acestora se montează sau un felinar cu petrol, sau o lampă electrică. În timpul zilei, vasele care trec observă destul de bine geamandurile, fiindcă acestea ies la suprafaţa apei. O dată cu căderea întunericului, trebuie să se aprindă felinarele. De obicei, această operaţie este efectuată de un lucrător special — geamanduristul. Acesta, cel puţin de două ori în timp de 24 ore, merge cu barca la geamanduri, aprinde felinarele, iar după aceea — la ivirea zorilor — le stinge. Toată această muncă obositoare pentru om poate fi preluată de o celulă fotoelectrică. Pe geamanduri se instalează baterii uscate şi relee fotoelectrice. Cînd cade întunericul, releele fotoelectrice conectează automat iluminatul electric. Lămpile ard atîta timp cît este întuneric. O dată cu ivirea zorilor, pentru un anumit grad de iluminare, releul fotoelectric deconectează lampa.

De o mare răspîndire se bucură metoda de analiză care a căpătat denumirea de titrare. Ea constă în faptul că unei soluţii care are caracter acid i se adaugă treptat cantităţi mici dintr-o substanţă bazică, amestecîndu-se continuu. Amestecarea durează pînă cînd cantitatea de substanţă bazică adăugată este suficientă pentru a neutraliza soluţia. Ştiind cîtă substanţă bazică s-a turnat în soluţia acidă, se poate stabili destul de precis cantitatea de acid care se găseşte în soluţie.

Punctul culminant este momentul cînd are loc neutralizarea completă; el nu trebuie trecut cu vederea. Cum să se stabilească dacă neutralizarea a avut loc sau nu? În acest scop se recurge la ajutorul unui indicator, de exemplu hîrtie de turnesol sau soluţii de turnesol şi fenolftaleină. Dacă există acid, soluţia de turnesol se va colora în roşu, iar dacă există o bază — în albastru. Cînd soluţia este neutralizată, ea capătă o nuanţă violacee caracteristică.

Iată cum această proprietate — variaţia culorii indicatorului — dă posibilitatea să se determine, cu ajutorul unei celule fotoelectrice, momentul cînd are loc neutralizarea completă.

În vasul în care se găseşte soluţia studiată, se toarnă o cantitate mică de soluţie de turnesol. În acest caz soluţia se va colora în albastru sau în roşu, după cum ea conţine o bază sau un acid. Se aprinde apoi o lampă cu incandescenţă, a cărei lumină, după trecerea printr-un filtru optic, traversează soluţia şi ajunge la celula fotoelectrică. Dintr-o biuretă începe să se picure sau un acid, sau o bază. În momentul cînd soluţia se va decolora, curentul care trece prin celula fotoelectrică se măreşte brusc şi pune în funcţiune un releu electromagnetic, care închide robinetul biuretei.

Pentru titrarea fotoelectrică are o importanţă esenţială alegerea raţională a fitrelor optice. Aici este important ca în momentul cînd survine decolorarea să aibă loc o variaţie bruscă a intensităţii fotocurentului.

Deosebit de important este rolul celulei fotoelectrice în cinematograful sonor, unde ea îndeplineşte o funcţiune importantă: transformă lumina într-un curent electric, iar acesta din urmă — prin intermediul unor instalaţii speciale — permite redarea sunetelor.

Există mai multe procedee de înregistrare a sunetului pe o peliculă cinematografică. Nu vom analiza amănunţit întreaga tehnică a înregistrării sonore. Vom menţiona numai că pe o parte a peliculei, împreună cu cadrele filmului, se deplasează continuu „pista sonoră“ (fig. 35).

Muzica sau vorbirea înregistrată pe peliculă este recepţionată la început de un microfon. Prin intermediul microfonului, vibraţiile sonore produc variaţii ale intensităţii unui curent electric. După ce este amplificat de mai multe ori, curentul face să varieze intensitatea unui izvor de lumină, exact în ritmul vibraţiilor sonore. Dacă se dirijează acest flux luminos de intensitate variabilă spre marginea unei pelicule cinematografice care se deplasează cu o viteză oarecare, acoperită cu o emulsie fotosensibilă, pe aceasta se va obţine — după revelare — o fîşie foarte îngustă cu grad de înnegrire diferit. Această aşa-numită „pistă sonoră“ va consta din linii transversale de transparenţă diferită. Lăţimea şi gradul de transparenţă al liniilor vor depinde de frecvenţă şi de intensitatea variaţiilor luminoase, cu alte cuvinte de frecvenţa şi de intensitatea vibraţiilor sonore.

Celula fotoelectrică nu a luat de loc parte la înregistrarea sunetului pe peliculă. Procesul invers, redarea sunetului, nu poate fi însă realizat fără o celulă fotoelectrică.

Să examinăm principiul care stă la baza acestui proces. Un fascicul luminos îngust, care pleacă de la o lampă electrică ce arde strălucitor, este proiectat pe pista sonoră a peliculei cinematografice. Trecînd prin peliculă, raza luminoasă ajunge la o celulă fotoelectrică. În timpul deplasării peliculei iluminarea celulei fotoelectrice va varia exact la fel cum variază înnegrirea peliculei cinematografice la înregistrarea sunetului. Celula fotoelectrică va debita un curent care variază la fel ca intensitatea luminii sub influența vibrațiilor sonore. Acest curent este apoi amplificat și aplicat unui difuzor care va reda vibrațiile sonore înregistrate pe peliculă.

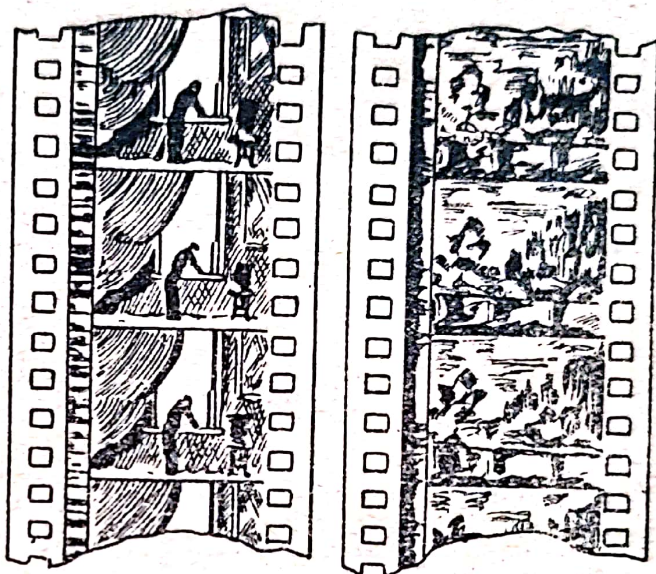


Fig. 35. Diferite tipuri de piste sonore

Firește, cititorul înțelege că exemplele date nu epuizează nici pe departe aplicațiile celulelor fotoelectrice în practică. Începînd din 1954 ele au început să prezinte interes nu numai ca indicatoare sensibile la lumină, dar și ca convertizoare de energie solară direct în energie electrică, avantajoase din punct de vedere economic. În anul 1958 a fost construită o nouă celulă fotoelectrică semiconductoare, din siliciu, cu randament foarte înalt, care la lumină solară directă atinge 10%.

Siliciul este un element care posedă proprietăți semiconductoare. El face parte din grupa a IV-a a sistemului periodic și este al doilea element, ca răspîndire, din natură. Greutatea lui atomică este de 28,06, iar numărul de ordine este 14. Temperatura de topire a siliciului cristalin este de 1415°C, iar temperatura de topire este de 2360°C. Conductivitatea electrică a siliciului, în funcție de felul și numărul de adaosuri introduse în el, variază între limite destul de largi: de la

$7 \cdot 10^2$ pînă la $10^{-1} \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$. Ultima cifră corespunde conductivității siliciului pur.

În decurs de relativ mulți ani, siliciul a constituit obiectul unor cercetări fizice multilaterale. În ultima vreme, fizicienii și-au îndreptat atenția în special asupra proprietăților lui electrice. Ca rezultat al unor lucrări de cercetare de mai mulți ani, au fost obținute numeroase rezultate care prezintă o mare importanță atît pentru teorie, cît și pentru practică. Dintre aceste rezultate trebuie menționată în mod special metoda obținerii siliciului cu tipul de conducție stabilit în prealabil — electronic sau prin goluri, care permite să se realizeze detectoare cu siliciu. Un rezultat la fel de esențial, fără îndoială, trebuie considerat elaborarea tehnologiei introducerii în monocristalul de siliciu a unor adaosuri de atomi străini, care permit să se obțină într-un singur cristal o joncțiunea *p—n* ,pe baza căreia a fost creată celula fotoelectrică de siliciu cu strat de blocare.

Tehnologia fabricării celulei fotoelectrice de siliciu este destul de complicată. Ea se reduce, în esență, la următoarele operații. La început, din siliciul topit „se cresc" monocristale mari. Creșterea cristalelor poate fi înfăptuită în diferite moduri. Unul dintre acestea constă în cufundarea, în siliciul topit, a unui „grăunte" care, după aceea, este tras foarte lent în sus. „Grăuntele", adică un monocristal mic din substanța respectivă, constituie un centru de cristalizare în jurul căruia începe cristalizarea. În timpul ridicării lente a „grăuntelui" începe formarea treptată a monocristalului de siliciu, ale cărui dimensiuni pot fi suficient de mari. Intreg acest proces se efectuează în condiții de vid înaintat.

Monocristalele de siliciu obținute se taie în plăcuțe subțiri, de formă dreptunghiulară, circulară sau oricare altă formă. Plăcuța posedă mecanism de conducție electronic. Pentru crearea unei celule fotoelectrice cu strat de blocare, este însă necesar un sistem format din două semiconductoare cu tipuri de conducție diferite. În acest scop, una dintre suprafețele plăcuței este acoperită cu un strat uniform subțire de bor și se încălezște cîtva timp plăcuța într-un cuptor electric, cu pompele de vidare funcționînd continuu. Timpul de încălzire se alege în așa fel, încît atomii de bor să reușească — în decursul acestei perioade — să difuzeze în interiorul plăcuței numai pînă la o anumită adîncime. Deoarece adăugarea boru-

lui la siliciu îi comunică acestuia din urmă o conducție prin goluri, ca rezultat, o parte din plăcuța de siliciu va prezenta conducție prin goluri, iar cea de a doua parte — o conducție electronică. La limita de separație dintre cele două părți se formează o joncțiune *p—n* și, ca urmare, stratul de blocare. Pe ambele suprafețe ale plăcuței de siliciu se depun — printr-o metodă specială — electrozi metalici, dintre care unul

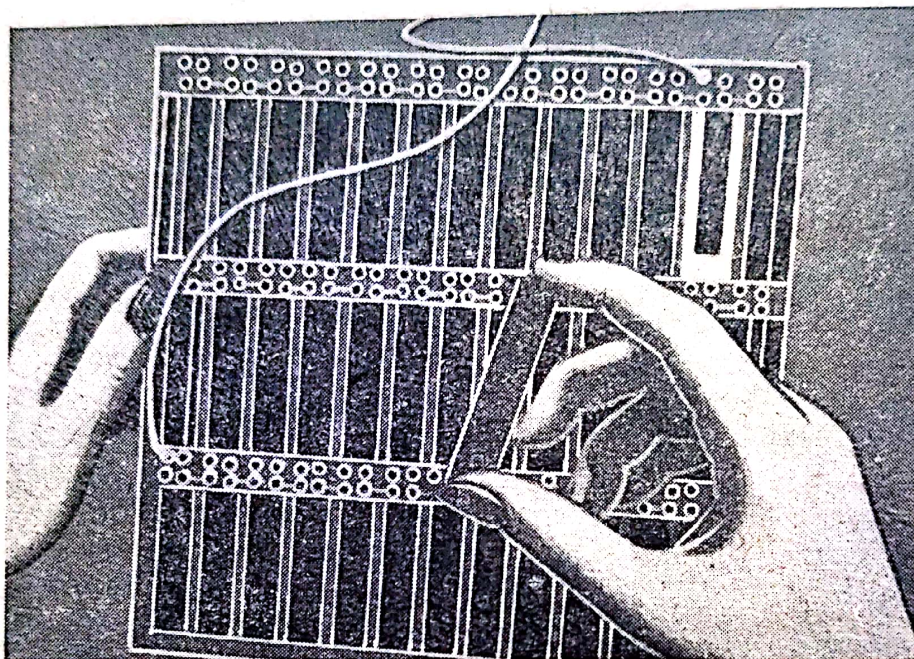


Fig. 36. Unul dintre primele modele de baterie solară

este semitransparent. După aceea se introduce plăcuța într-o montură cu două borne.

Deși au realizat un dispozitiv atît de remarcabil, cum este celula fotoelectrică de siliciu, totuși fizicienii nu au reușit încă să fabrice celule cu suprafață mare. De aceea, în prezent se leagă în serie mai multe celule fotoelectrice, formînd în felul acesta o baterie care a căpătat pe merit denumirea de „baterie solară“; un model de asemenea baterie este arătat în fig. 36.

La nivelul actual al tehnicii semiconductoarelor, celulele fotoelectrice de siliciu permit să se obțină, într-o zi cu soare, pînă la 100 W de energie electrică de la fiecare metru pătrat de suprafață fotosensibilă, adică cu un randament de circa 10%.

Dar ce înseamnă acest procentaj de 10% ? Vom da cîteva cifre comparative. Izvorul întregii vieţi este soarele. Absorbind energia razelor solare, un mic arbust creşte şi se transformă într-un arbore puternic. Botaniştii au calculat foarte precis că, arzînd lemn, obţinem o cantitate de energie cel puţin de 100 ori mai mică decît aceea pe care arborele o primeşte de la soare în timpul creşterii lui. Aceasta înseamnă că, în lumea plantelor, randamentul de utilizare a energiei solare este sub 1%. Un randament încă şi mai mic de utilizare a energiei solare au motoarele eoliene şi chiar şi cele mai moderne instalaţii hidrotehnice.

Vom da încă un exemplu, din alt domeniu, şi anume din acela al transformărilor energetice obişnuite. Locomotiva are un randament de numai circa 8%, şi doar locomotiva este o construcţie complicată şi voluminoasă cu un mare număr de piese în mişcare, în timp ce o celulă fotoelectrică este asemănătoare mai curînd cu o jucărie decît cu un dispozitiv energetic important. În plus, spre deosebire de alte transformatoare de energie, durata de seriviciu a celulelor fotoelectrice semiconductoare poate fi extrem de îndelungată, iar în unele cazuri — practic infinită.



Fig. 37. Receptor de radiodifuziune alimentat prin intermediul a 7 celule fotoelectrice cu siliciu

Aceste exemple sînt absolut suficiente pentru a ne forma o imagine clară despre posibilităţile celulei fotoelectrice cu siliciu de a transforma energia solară în energie electrică.

Bateria solară constituie un instrument remarcabil pentru raioanele neelectrificate. Acolo ea poate fi folosită la încărcarea acumulatoarelor, alimentarea radioreceptoarelor şi radioemiţătoarelor de dimensiuni mici, a centralelor telefonice şi în alte scopuri. În fig. 37 este arătat aspectul exterior al unui radioreceptor cu 8 tranzistoare de germaniu, alimentat de 7 celule fotoelectrice de siliciu, construite sub formă de discuri şi instalate pe capacul superior al aparatului. Fotografia a înregistrat momentul cînd, în pauza dintre băi, o fată ascultă o emisiune de radio pe plajă.

În fig. 38 este arătat aspectul exterior al unui receptor cu 4 celule fotoelectrice de seleniu de formă dreptunghiulară. Acest tip de receptor nu are difuzor. În locul lui se folosește o cască telefonică (fig. 39).

Firma americană „Bell“ a construit o baterie solară formată din 432 celule fotoelectrice de siliciu, avînd forma circu-

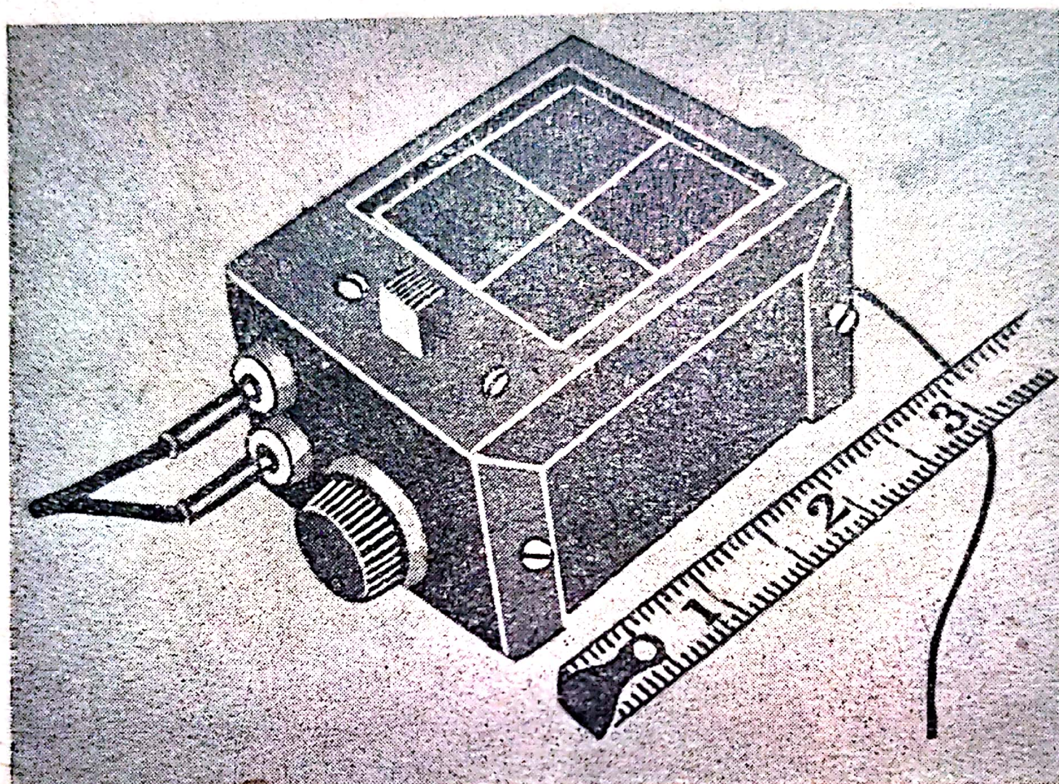


Fig. 38. Radioreceptor cu patru celule fotoelectrice cu seleniu. Lîngă receptor este așezată o riglă gradată în țoli

lară. Aceste baterii se instalează pe stîlpii telefonici și servesc la alimentarea liniilor telefonice rurale (fig. 40). Bateria încarcă simultan și un acumulator și, la căderea întunericului, un releu special comută automat linia telefonică pentru alimentarea de la acest acumulator.

Inventatorii celulelor fotoelectrice cu siliciu au construit un radioemițător de dimensiuni mici, cu diode și tranzistoare cu germaniu. Acest emițător, arătat în fig. 41, necesită o putere neînsemnată, furnizată din plin de cîteva celule fotoelectrice de siliciu.



Fig. 39. Radioreceptor cu cască

O revistă ştiinţifică, analizînd posibilităţile şi perspectivele noilor celule fotoelectrice generatoare, scria în 1954 că o celulă fotoelectrică perfecţionată, cu suprafaţa de 5,5 m², aşezată pe acoperişul unei case, va putea furniza o energie electrică suficientă pentru satisfacerea, în timp de 24 ore, a tuturor cerinţelor de energie necesare acestei case pentru iluminat, încălzit, alimentarea frigiderului şi a plitei electrice pentru pregătirea alimentelor.

Fireşte, există diferite feluri de case. Cu toate acestea, dacă o celulă fotoelectrică de dimensiunile amintite va putea într-adevăr să asigure iluminarea şi încălzirea chiar şi a

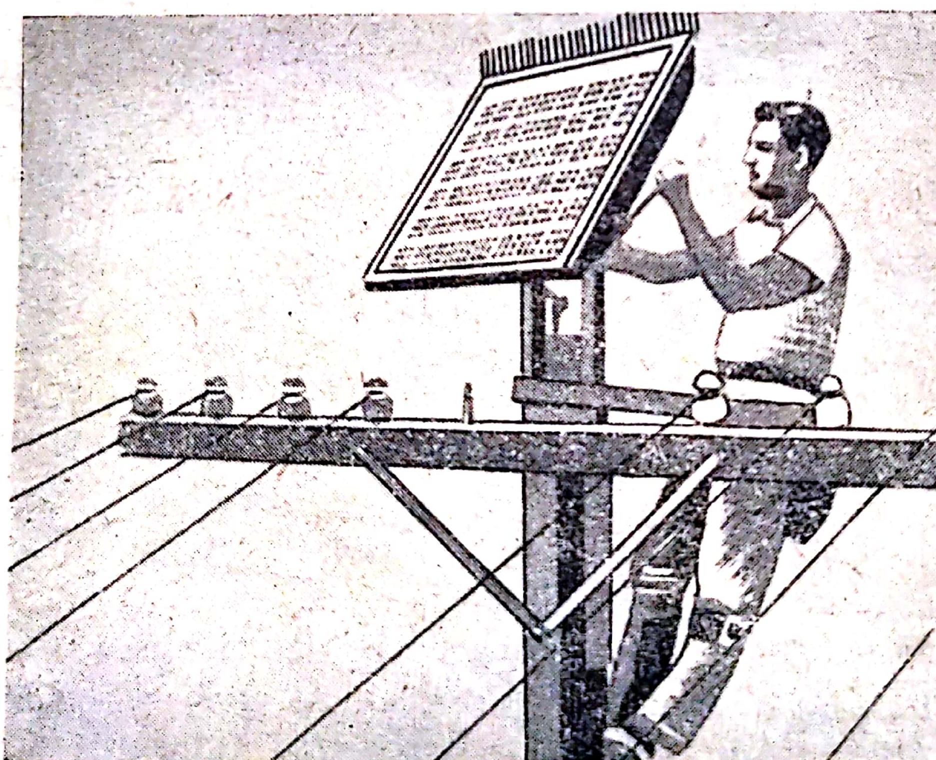


Fig. 40. Baterie solară alcătuită din 432 celule fotoelectrice cu siliciu



unei case foarte mici, pentru o singură familie, acest fapt va constitui prin sine însuşi o cotitură importantă în ştiinţă. Acest eveniment nu a avut încă loc, dar nu există nici un fel de îndoială că el se va întîmpla foarte curînd.



Fig. 41. Radioemiţător portativ alimentat de o baterie din celule fotoelectrice cu siliciu

10. BATERIA ATOMICA

Destul de recent, la sfîrşitul anului 1953, fizicienii au dobîndit încă o mare victorie, realizînd bateria atomică. Drept material pentru aceasta s-a folosit tot siliciul.

Bateria atomică este un dispozitiv cu semiconductor care creează energie electrică pe seama radiaţiilor nucleare ale unui element oarecare. In cazul concret considerat de noi, acest element este stronţiul radioactiv.

Stronţiul este un element aşezat în grupa a II-a a sistemului periodic al lui Mendeleev. Numărul lui de ordine este 38, iar greutatea atomică 87,63. Stronţiul nu este prea răspîndit în natură, ci constituie numai circa 0,008% din numărul total de atomi din scoarţa pămîntească. In mod obişnuit, stronţiul este întîlnit nu sub forma de element liber, ci sub formă de compuşi chimici, de exemplu sulfat sau carbonat de stronţiu.

Deoarece, la fel cu vecinii lui de grupă, calciul şi bariul, stronţiul este extrem de activ, el se oxidează destul de repede

în prezenţa aerului, se combină cu multe elemente şi, de asemenea, interacţionează cu apa. Acest stronţiu „obişnuit" nu posedă nici un fel de proprietăţi radioactive. La fel ca şi multe alte elemente din sistemul periodic, stronţiul cu greutatea atomică 87,63 reprezintă în realitate un amestec de mai mulţi izotopi de greutăţi atomice diferite. Reamintim că se numesc izotopi acele elemente chimice care posedă proprietăţi chimice practic identice, dar se deosebesc unul de altul prin greutăţile atomice. Aproape fiecare element al sistemului periodic are izotopii lui. De exemplu, magneziul, care se găseşte în grupa a II-a a sistemului periodic şi are greutatea atomică 24,32, este de fapt alcătuit din trei feluri de magneziu, adică din trei izotopi: unul dintre ei are greutatea atomică 23,99, al doilea — greutatea atomică 24,99, iar ultimul — greutatea atomică 25,99. Elementul nichel, din grupa a VIII-a, are cinci izotopi cu următoarele greutăţi atomice: 57,96; 59,95; 60,95; 61,95; 63,95. Greutatea atomică dată în tabelă a nichelului este 58,69. Mercurul are 7 izotopi, plumbul — 10 etc. Un număr încă şi mai mare de izotopi au elementele radioactive, inclusiv — fireşte — şi cele făcute radioactive în mod artificial, la care radioactivitatea apare după o prelucrare specială a nucleelor stabile.

Din numărul elementelor artificial radioactive face parte şi stronţiul; acesta are 10 izotopi. Printre aceşti izotopi există unul cu greutatea 90, adică stronţiul-90, care constituie un reziduu la exploatarea unui reactor atomic. În timpul dezagregării lui radioactive, el emite radiaţii β, adică electroni. În acest caz este caracteristic şi excepţional de important faptul că electronii emişi de stronţiul-90 posedă viteze considerabile şi, în consecinţă, valori mari ale energiilor cinetice. În afară de aceasta, are o importanţă esenţială şi durata de înjumătăţire a stronţiului-90, egală cu 25 ani. În decursul acestui interval de timp destul de lung, numai jumătate din cantitatea iniţială de stronţiu este supusă dezagregării radioactive.

Tocmai aceste proprietăţi ale stronţiului-90 au făcut posibilă folosirea lui în bateria atomică, a cărei denumire este legată de faptul că sursa iniţială de energie este aici de fapt un reactor atomic.

Cum este alcătuită această baterie?

Se confecţionează o plăcuţă mică dintr-un monocristal de siliciu, care este apoi pusă în contact cu un electrod metalic. Prin prelucrarea specială a unei părţi a monocristalului se

creează siliciu electronic, iar în altă parte — siliciu cu goluri. Dacă privim plăcuța de siliciu care, să admitem, este așezată pe o masă, toate elementele ei se succed în următoarea ordine: siliciul cu goluri, siliciul electronic, electrodul metalic. Contactul dintre partea cu goluri a monocristalului și cea cu electroni duce la formarea stratului de blocare. Nu este dificil să se observe că construcția dispozitivului descris nu se deosebește în principiu prin nimic de construcția celulelor fotoelectrice generatoare și, în particular, de aceea a bateriei solare. Și aici și acolo există: un semiconductor electronic, care vine în contact cu un semiconductor cu goluri, un strat de blocare și un electrod metalic. Dar în construcția bateriei atomice mai există o particularitate ce deosebește bateria atomică de celula fotoelectrică generatoare. Această particularitate constă în faptul că pe suprafața liberă a monocristalului de siliciu se depune un strat subțire de stronțiu-90 radioactiv, iar deasupra acestui strat — un electrod. Stronțiul emite electroni de mari energii. Electronii care pleacă pătrund în grosimea plăcuței de siliciu și provoacă apariția, în aceasta, a electronilor de conducție. Fiecare electron primar produce în siliciu 200 000 electroni secundari de conducție, de energii mai mici. Acești electroni se deplasează prin stratul de blocare spre unul dintre electrozi; ca rezultat, între un electrod și celălalt se creează o diferență de potențial. Dacă între electrozi se stabilește o legătură printr-un circuit metalic, în acesta va apărea un curent electric care poate fi folosit în mod corespunzător.

Deoarece perioada de înjumătățire a stronțiului-90 este suficient de mare, durata de serviciu a bateriei este și ea mare și numără cel puțin 20 ani.

Cîteva plăcuțe de siliciu, conectate una cu alta în serie sau în paralel, formează o baterie care poate fi folosită cu succes pentru alimentarea emițătoarelor radiotelegrafice, a receptoarelor și a altor aparate electronice construite cu diode semiconductoare și tranzistoare.

După cum nu este greu să se observe, natura fenomenelor care se desfășoară într-o baterie atomică este analogă cu a fenomenelor ce se produc în orice celulă fotoelectrică generatoare. Unica diferență dintre celula fotoelectrică și bateria atomică constă în faptul că în primul caz semiconductorul este iradiat cu lumină, în timp ce în al doilea caz el este iradiat cu electroni.

Inventarea bateriei atomice, fără îndoială, constituie un mare succes. După ce randamentul bateriei va fi mărit pînă la cîteva procente (în prezent el este egal cu 1%), limitele domeniilor posibile de aplicații se vor extinde considerabil.

11. FERITELE

În ultimii ani, în electrotehnică — mai ales în radiotehnică — au început să se folosească materiale semiconductoare feromagnetice, așa-numitele ferite. În virtutea proprietăților lor, feritele înlocuiesc cu succes — în numeroase cazuri — alte materiale feromagnetice, în particular fierul. Pentru a ne imagina cît mai bine în ce constă sensul acestei înlocuiri, este necesar să examinăm la început, deși numai foarte superficial, ce se întîmplă cu un material feromagnetic, atunci cînd el este introdus într-un cîmp magnetic exterior.

Feromagnetismul unor metale și aliaje este explicat de fizica modernă prin faptul că în materialul feromagnetic există un număr uriaș de regiuni microscopice ca dimensiuni, numite „domenii". Fiecare domeniu de acest fel, pînă la așa-numita temperatură Curie (punctul Curie) este deja magnetizat prin sine însuși și posedă un moment magnetic oarecare, orientat arbitrar în spațiu. La temperaturi mai mari decît punctul Curie, magnetizarea spontană dispare. Dimensiunile liniare ale domeniilor sînt de circa 10^{-4} cm la fierul moale. În absența unui cîmp magnetic exterior, momentele magnetice ale domeniilor vor avea o orientare haotică. Cînd materialul feromagnetic ajunge într-un cîmp magnetic exterior, acesta din urmă tinde să orienteze domeniile în așa fel, încît momentele lor magnetice să fie dirijate în lungul cîmpului exterior. Acest fapt este împiedicat de frecarea internă. Pînă la temperatura punctului Curie, însă, mișcarea termică nu este capabilă de a învinge influența cîmpului magnetic exterior și, o dată cu creșterea intensității acestuia, domeniile — prin urmare și momentele magnetice — se rotesc din ce în ce mai mult înspre direcția cîmpului magnetic, pînă cînd se vor aranja exact în lungul liniilor de forță ale cîmpului, ceea ce corespunde cazului saturației complete. Este cît se poate de evident că o dată cu creșterea temperaturii, cînd mișcarea termică se intensifică, cîmpului magnetic exterior îi vine din ce în ce mai greu să ordoneze orientarea momen-

telor magnetice din interiorul domeniilor şi, dimpotrivă, o dată cu scăderea temperaturii acest proces este înlesnit.

Din aspectele magnetizării materialelor feromagnetice, pe care tocmai le-am examinat, rezultă că rotirea domeniilor este însoţită de un fel de „frecare". De aceea, cînd materialul feromagnetic se află într-un cîmp magnetic exterior variabil, el se încălzeşte considerabil, ceea ce duce la o pierdere inutilă de energie. Dar încălzirea unui metal feromagnetic este condiţionată încă şi de o altă cauză fizică, şi anume de curenţii turbionari (Foucault). Intensitatea curenţilor turbionari este cu atît mai mare, cu cît conductibilitatea electrică a metalului este mai mare şi cu cît frecvenţa cîmpului magnetic este mai înaltă. Reamintim că tocmai această împrejurare se află la baza construcţiei cuptoarelor cu inducţie în înaltă frecvenţă, cu ajutorul cărora se pot topi metale.

Dacă miezul unui transformator este confecţionat sub forma unei bucăţi de metal masive, în timpul funcţionării transformatorului miezul se va încălzi puternic. Această încălzire inutilă va absorbi energie electrică. Cum se pot combate curenţii turbionari parazitari? Există mai multe procedee. Unul dintre cele mai răspîndite constă în confecţionarea miezurilor transformatoarelor nu din bucăţi de metale masive, ci din tole relativ subţiri, izolate între ele. O altă metodă se bazează pe folosirea unui miez din material magnetodielectric, adică din praf de fier presat, amestecat în prealabil cu o masă liantă izolantă. Există şi alte căi de a realiza acest lucru.

Toate procedeele descrise devin însă neraţionale la frecvenţe înalte, care se întîlnesc — de exemplu — în radiotehnică. De aceea, timp de mai mulţi ani s-a căutat pe toate căile o ieşire din impas. Soluţia radicală a problemei a fost găsită atunci cînd cercetătorii au început să folosească, pentru scopurile amintite, materiale feromagnetice semiconductoare — feritele. După cum s-a dovedit, printre semiconductoare există substanţe care posedă o conductibilitate electrică foarte mică şi proprietăţi magnetice deosebite. Combinarea ambelor aceste proprietăţi a dat posibilitatea să se folosească pe scară largă feritele în aparatele care funcţionează la frecvenţe înalte. Deoarece feritele au o rezistenţă mare, pierderile inutile — legate de curenţii turbionari — devin minime în cazul lor.

Din ferite se confecţionează miezurile transformatoarelor, ale bobinelor de inductanţă din circuitele de frecvenţe inter-

mediare şi înalte, precum şi alte piese radiotehnice (fig. 42). Folosirea feritelor în acest scop dă posibilitatea să se mărească factorul de calitate al bobinelor, să se micşoreze dimensiunile lor şi să se varieze lin inductanţa unei bobine. Ultima operaţie se efectuează prin deplasarea înainte şi înapoi a unui miez de ferită.

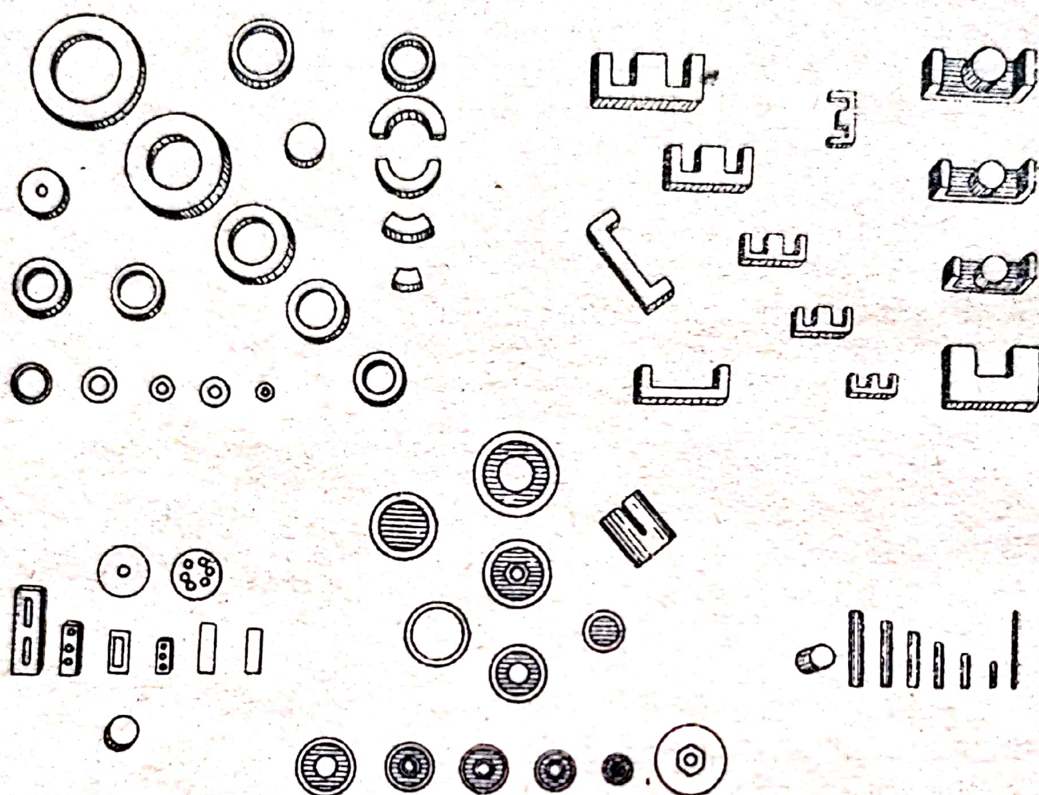


Fig. 42. Piese confecţionate din ferite

12. LUMINOFOARELE

În ştiinţă şi tehnică încep să joace un rol din ce în ce mai important luminofoarele, nişte substanţe semiconductoare care emit lumină rece. Cu ajutorul lor a fost posibil să se rezolve probleme tehnice esenţiale.

Proprietatea de a emite lumină nu este un privilegiu numai al unor anumite substanţe semiconductoare. Există, de exemplu, materiale luminescente de provenienţă organică. Pentru aplicaţiile tehnice, însă, cea mai mare valoare o au numai luminofoarele semiconductoare.

Tehnologia fabricării compuşilor luminescenţi a ajuns la un nivel atît de înalt, încît a devenit posibil să se creeze

luminofoare cu durată de luminescență diferită și cu compoziție spectrală variată.

Luminescența a numeroase substanțe continuă pentru un timp oarecare, nu prea lung, iar după aceea dispare. Substanțele de acest fel se numesc luminofoare cu acțiune temporară. Spre deosebire de acestea mai există și compuși luminescenți cu acțiune continuă, care emit lumină în decursul unui interval de timp îndelungat, ce ajunge uneori pînă la cîteva zeci de ani. O asemenea emisiune îndelungată de lumină se realizează prin faptul că în compusul luminos intră o cantitate mică de preparate radioactive, care constituie tocmai sursa de excitație a atomilor luminoforului.

Luminofoarele cu acțiune temporară, folosite în practică, trebuie să satisfacă o serie întreagă de condiții; de aceea, din infinita varietate de semiconductoare, numai cîteva sînt potrivite pentru prepararea luminofoarelor. De cea mai largă răspîndire se bucură luminofoarele avînd următoarele compoziții: sulfurile ZnS, CdS, CaS, SrS, MgS, BaS, oxizii CaO, SrO, MgO, BaO, wolframații $CaWO_4$, $CdWO_4$, $MgWO_4$ și compușii Zn_2SiO_4, $CdSiO_3$, CdB_2O_4, ZnB_2O_4, $MgSiO_3$. Fiecare dintre aceste substanțe conține un activator, adică un adaos dintr-un metal oarecare. Pentru ca luminoforul să fie de calitate bună, este necesar ca el să fie preparat din materiale extrem de pure, fără nici un fel de substanțe străine. Condiții identice sînt impuse, firește, și procesului însuși de preparare a luminoforului, care trebuie să se desfășoare în condiții de curățenie excepțională.

O metodică judicios elaborată de preparare a tuturor luminofoarelor posibile, cu proprietăți dinainte date, permite să se prepare și luminofoare care, sub acțiunea luminii, înmagazinează energie, dar nu luminează ele însele. Pentru ca un asemenea luminofor să înceapă să emită lumină este necesar ca el să fie „iluminat", în prealabil, cu raze infraroșii. În acest caz, razele infraroșii au rolul chibritului care dă foc prafului de pușcă. Energia de excitație este conținută în luminofor, dar este necesar un impuls oarecare dinafară, pentru a se elibera această energie. Iar impulsul este tocmai radiația infraroșie.

Luminofoarele cu asemenea proprietăți prezintă un mare interes practic, deoarece energia înmagazinată de ele poate fi eliberată numai atunci cînd este necesar.

Pe de altă parte, a fost elaborată și tehnologia de preparare a unor luminofoare a căror luminescență este „stinsă"

de aceleaşi raze infraroşii. Un astfel de luminofor după „încărcarea“ la lumină, devine luminescent pentru o perioadă de timp oarecare. Este însă suficient ca el să fie „iluminat“ cu radiaţii infraroşii, pentru ca luminescenţa sa să înceteze imediat. Înacest caz, energia de excitaţie — sub acţiunea razelor infraroşii — nu se transformă în energie luminoasă, ci în energie termică.

Luminescenţa tuturor luminofoarelor cu acţiune temporară se atenuează în timp şi pînă la urmă dispare. Acest fapt este de la sine înţeles: luminoforul nu poate da mai mult decît a primit în timpul încărcării la lumină. Însuşi procesul de atenuare depinde de compoziţia luminoforului, de natura activatorului şi urmează legile lui. Temperatura luminoforului are o influenţă simţitoare atît asupra intensităţii luminescenţei lui, cît şi asupra duratei de emitere a luminii. O dată cu creşterea temperaturii, luminoforul începe să lumineze mai strălucitor, dar totodată capacitatea lui de luminare se epuizează mai repede. La o temperatură suficient de scăzută, luminoforul nu radiază şi toată energia de excitaţie înmagazinată în el rămîne ascunsă în el pînă cînd temperatura lui va creşte.

Există mai multe procedee de depunere a luminofoarelor pe suprafaţa obiectelor. Majoritatea dintre acestea constă în faptul că compusul luminescent nu este măcinat prea fin, iar pulberea obţinută — compusă din grăunţi relativ mari — se amestecă cu un mediu liant oarecare: lac, gelatină, o vopsea cu clei sau ulie, şelac sau alte substanţe. Masa pregătită sub formă de lichid vîscos se depune pe suprafaţa obiectului. Uneori, suprafaţa compusului luminescent se acoperă cu un lac transparent pentru a proteja compusul luminescent împotriva acţiunii dăunătoare a atmosferei.

Adesea, se amestecă substanţa luminoasă cu o masă plastică şi în acest caz obiectul confecţionat din această masă plastică începe să devină luminescent după încărcarea la lumină.

Pentru anumite scopuri, se impregnează ţesături. cu substanţă luminoasă, sau se introduce substanţa luminoasă în lichide, în sticlă şi se prepară vopsele fosforescente.

În una dintre cărţile sale, academicianul S. I. Vavilov scria: „Nu este necesar să ai un dar deosebit al previziunii, pentru ca să prezici că nu este departe timpul cînd „lumina rece“ va deveni pentru fiecare dintre noi un factor atît de inevitabil şi obişnuit al vieţii de zi cu zi, cum este lampa

electrică cu incandescență". Aceste cuvinte, rostite acum cîțiva ani, s-au adeverit aproape în întregime încă de pe acum: zi cu zi, „lumina rece" pătrunde din ce în ce mai profund în viața noastră obișnuită. Substanțele luminescente au început să fie folosite în secțiile uzinelor și în fermele colhoznice, în spitale și laboratoare științifice, în tehnica telecomunicațiilor și în transporturi, în instalațiile de radiolocație și televiziune, în multe ramuri ale tehnicii și economiei naționale. Pentru ilustrarea acestei afirmații, vom da cîteva exemple de aplicații în practică ale materialelor luminescente.

1. **Lămpile fluorescente.** Se știe că cele mai neeconomice izvoare de lumină sînt izvoarele termice, care emit lumina datorită transformării energiei termice în energie radiantă Dintre izvoarele termice de lumină, cele mai moderne sînt lămpile electrice cu incandescență. Randamentul acestora este extrem de scăzut și nu depășește 3,5% nici chiar la lămpile cu puterea de peste 1 000 W. În ce privește lămpile de putere mică, randamentul lor este încă și mai scăzut, pentru o lampă de 40 W el fiind egal cu 1,5%. Acest randament scăzut se explică prin faptul că filamentul incandescent al lămpii emite un spectru suficient de larg. Partea principală din energia radiată, mai precis peste 90%, revine însă razelor infraroșii invizibile. De aceea, încă de mult a devenit actuală problema măririi, prin toate mijloacele posibile, a randamentului izvoarelor de lumină. În Uniunea Sovietică, în 1931, s-a făcut un pas mare în această direcție: academicianul S. I. Vavilov a propus ca suprafața interioară a pereților unei lămpi cu descărcări în gaze să fie acoperită cu un luminofor, pentru transformarea radiațiilor ultraviolete invizibile în radiații vizibile. Curînd, această idee și-au găsit soluția practică.

Lampa cu descărcări în gaze, de joasă tensiune, este de construcție simplă și reprezintă un tub de sticlă. La capetele tubului sînt lipite niște spirale de wolfram. Din tub se scoate aproape complet aerul și în locul lui se introduce argon care creează în tub o presiune de circa 4 mm col. Hg, iar după aceea o cantitate mică de vapori de mercur care dau o presiune de aproximativ 0,01 mm col. Hg. Tubul se conectează în circuit în felul în care se arată schematic în fig. 43. La început se încălzesc spiralele de wolfram, care după aceea încep să emită electroni. Electronii, zburînd prin spațiul tubului, excită moleculele gazului, iar acestea încep să emită

lumină. După ce în tub apare descărcarea în gaze, filamentul spiralelor de wolfram se deconectează automat și toată căderea de tensiune se concentrează mai ales la bornele lămpii însăși. În continuare, emisiunea de electroni de la spirale este întreținută de descărcarea însăși. Dacă suprafața interioară a pereților unei lămpi cu descărcări în gaze este acoperită cu un strat subțire de luminofor, acest dispozitiv va reprezenta tocmai lampa fluorescentă modernă.

Mecanismul proceselor care au loc în lămpile fluorescente este cît se poate de ușor de înțeles. Cînd lampa este conectată la rețea, în ea începe descărcarea în gaze, care este însoțită de luminescență. Compoziția gazului din interiorul tubului și regimul de descărcare se aleg în așa fel, încît — pe cît este posibil — cea mai mare parte din puterea radiată să revină razelor ultraviolete invizibile, iar cea mai mică parte — radițiilor vizibile. La lămpile moderne, radiațiile ultraviolete constituie aproximativ 90% din întreaga putere radiată de lampă, iar cele vizibile — circa 3%. Absorbind radiațiile ultraviolete, substanța luminescentă depusă pe suprafața interioară a pereților lămpii emite, în conformitate cu legea lui Stokes, radiații de lungime de undă mai mare, adică radiații vizibile.

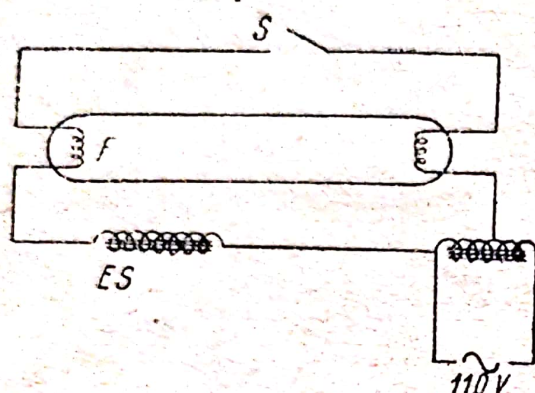


Fig. 43. Schema de conectare a unei lămpi fluorescente:
F — spirale de wolfram incandescente, ES — bobină de șoc limitatoare de curent, T — autotransformator, S — comutator

Acoperind suprafața interioară a pereților lămpii cu diferite luminofoare, se pot obține lămpi fluorescente care emit lumină de diverse culori: albastră, roză, galbenă, verde etc. Lămpile de acest fel sînt însă folosite în special pentru scopuri de reclamă sau pentru luminarea foaierelor teatrelor, a cluburilor și a altor locuri publice. Aplicațiile principale ale lămpilor fluorescente sînt însă acelea în care ele sînt folosite drept izvoare artificiale de lumină albă. Dacă pereții interiori ai tubului sînt acoperiți cu un luminofor complex, care constituie un amestec de diferite luminofoare, se poate face ca lampa să emită o lumină apropiată, prin compoziția ei spectrală, de lumina naturală a zilei. Lămpile de acest fel se numesc lămpi de lumină a zilei și sînt folosite și în Uniunea Sovietică pe scară foarte largă.

Ce avantaje prezintă lămpile fluorescente în comparaţie cu alte izvoare de lumină? Avantajele principale ale acestor lămpi constă în faptul că, în primul rînd, ele sînt mult mai economice decît lămpile electrice cu incadescenţă; în al doilea rînd, radiaţia lor este distribuită pe o suprafaţă relativ mare; în al treilea rînd, se poate modifica uşor compoziţia spectrală a luminii emise şi, în fine, durata lor de serviciu este de cel puţin trei ori mai lungă decît durata de serviciu a lămpilor cu incandescenţă. In prezent, lămpile de lumină a zilei posedă un randament care, la lampa de 40 W, ajunge pînă la 7,2%, în timp ce o lampă cu incandescenţă de 40 W are un randament de numai 1,5%. Este adevărat că o dată cu creşterea puterii lămpilor cu incandescenţă randamentul lor se măreşte pînă la 3,5%, totuşi — în medie — randamentul lămpilor fluorescente este de 3 ori mai mare decît randamentul lămpilor cu incandescenţă, ceea ce — la mărimea Uniunii Sovietice — constituie, fără îndoială, un factor de excepţională importanţă. Durata de serviciu a lămpilor cu incandecenţă depăşeşte rareori 1 000 ore. In cazul unei exploatări normale, lămpile fluorescente ies însă din funcţiune după cel puţin 3 000 ore de lucru. Fireşte, toate aceste avantaje nu constituie limita celor ce se pot obţine. Inţelegerea mecanismului intim al proceselor de fluorescenţă ne dă motive serioase să sperăm că toţi parametrii lămpii fluorescente, în special randamentul ei, vor putea fi considerabil măriţi. In orice caz, se poate afirma cu îndrăzneală că peste cîţiva ani iluminatul artificial va fi asigurat mai ales cu lămpi de lumina zilei, perfecţionate.

2. **Analiza pe bază de luminiscenţă.** Majoritatea substanţelor, cu foarte rare excepţii, posedă capacitatea de a emite radiaţii proprii sub influenţa radiaţiilor violete; aceste radiaţii diferă, la unele dintre ele, atît în ce priveşte culoarea, cît şi intensitatea lor. Aceste proprietăţi au dat posibilitatea ca în multe cazuri să se folosească aşa-numita analiză pe bază de luminescenţă.

Cu ajutorul acestui mod de analiză se poate determina prezenţa unei substanţe oarecare. Ca exemplu se poate arăta că această metodă de analiză permite să se detecteze 10^{-13} g fluoresceină, dizolvată în 1 cm^3 de apă. La iradierea soluţiei cu raze ultraviolete, soluţia emite o lumină verde. Prin aceeaşi metodă se poate determina conţinutul la unele vitamine. In acest caz, precizia analizei este considerabil mai mare decît precizia analizei chimice calitative şi cantitative

obişnuite. În funcţie de culoarea luminii emise, se pot distinge foarte precis unele sorturi de făină de altele, sau se poate determina calitatea ovăzului şi a altor cîteva grîne. Analiza bazată de fotoluminescenţă a pătruns adînc nu numai în tehnică şi ştiinţă, dar şi în agricultură. Cu ajutorul ei se determină gradul de stricare a legumelor, fructelor, produselor uleioase, peştelui, ouălor, faptul cel mai remarcabil fiind că această metodă permite să se stabilească începutul procesului de stricare în stadiul lui cel mai timpuriu, ceea ce are o importanţă mare, în special la fabricarea conservelor.

Analiza bazată pe luminescenţă, folosită în tehnică, permite să se efectueze sortarea sigură a sticlei optice, a hîrtiei şmirghel şi a multor alte substanţe. Metoda luminescenţei este utilizată şi în defectoscopie. Ca exemplu se poate arăta că, cu ajutorul ei se descoperă cele mai fine fisuri din produsele confecţionate din metal sau alte materiale. În acest scop, piesa cercetată se introduce, pentru o perioadă de timp oarecare, într-o vană care conţine o soluţie fluorescentă încălzită. Dacă în piesă există fisuri, soluţia va intra în mod obligatoriu în ele. La examinarea cu raze ultraviolete, ele vor fi descoperite uşor.

Analiza bazată pe luminescenţă este folosită şi pentru determinarea gradului de puritate al multor reactivi. În industria textilă, a hîrtiei, chimică, a aparatelor electrice cu vid şi în altele, metoda de analiză bazată pe luminescenţă se foloseşte pe scară foarte largă şi cu mare succes. În afară de toate cele arătate, cu ajutorul ei se realizează destul de simplu şi sigur toate operaţiile posibile de sortare şi rebutare.

Analiza bazată pe luminescenţă se foloseşte în prospecţiunile geologice pentru descoperirea petrolului, în hidrogeologie — pentru descoperirea scurgerilor dintre rezervoarele de reţinere, în paleontologie — pentru studiul florei şi faunei preistorice etc.

În criminologie şi în expertizele medico-legale, analiza bazată pe luminescenţă a devenit unul dintre mijloacele de cercetare cele mai importante. Ea permite să se descopere toate felurile posibile de falsuri, plastografii şi urme de scris mascate cu grijă. Fizicianul sovietic D. N. Lazarev, în una dintre cărţile sale, scrie: „Metoda luminescenţei vine în ajutorul experţilor la identificarea briliantelor false şi la stabilirea autenticităţii tablourilor". R. Ia. Gasul şi A. A. Sakov au descris un caz cînd un colecţionar, care a cumpărat un tablou cu semnătura Aivazovski, s-a îndoit de autenticitatea lui şi

a intentat o acţiune judiciară împotriva persoanei care i-a vîndut tabloul. Experţii convocaţi au fost de păreri diferite: doi au afirmat că tabloul este original, iar doi au susţinut că este o imitaţie. Disputa a fost rezolvată numai după iradierea tabloului cu lumină neagră (ultravioletă), sub acţiunea căreia pe tablou a fost descoperită o a doua iscălitură (sub iscălitura falsă cu numele Aivazovski), care a devenit luminoasă sub stratul de vopsea de ulei depus peste ea şi care reprezenta spumă de mare.

Prof. K. I. Tatiev a descris un caz din practica poliţiei judiciare, cînd metoda de cercetare prin intermediul luminescenţei a permis să se descopere făptaşii unui furt săvîrşit la un depozit de blănuri. În decursul unei perioade de timp îndelungate, la acest depozit s-au observat sustrageri sistematice de piei de astrahan. De furt au fost bănuiţi paznicii de noapte, dar nu existau dovezi. O dată, înainte de închiderea depozitului, lucrătorii poliţiei judiciare au presărat pe nevăzute salicilat de sodiu pe blănuri. Cînd în dimineaţa următoare a fost descoperit un nou furt, bănuiţii au fost aduşi într-un laborator şi iradiaţi cu lumină neagră. La unul dintre paznici s-a observat că întreaga îmbrăcăminte, din cap pînă în picioare, devenise luminescentă, lumina emisă avînd culoarea violetă caracteristică pentru preparatele salicilice.

Analiza bazată pe luminescenţă este folosită şi ca mijloc de efectuare a expertizelor prin care se stabileşte atît autenticitatea unei opere de artă, cît şi — în unele cazuri — vîrsta ei. Aceeaşi metodă dă posibilitatea să se descopere o restaurare invizibilă, oricît de fină şi iscusită ar fi ea. O vază de flori lipită, o sculptură sau orice altă operă restaurată îşi dezvăluie uşor cusururile sub acţiunea radiaţiilor ultraviolete. În acest caz, locurile de îmbinare emit o lumină fluorescentă diferită de aceea a celorlalte părţi ale obiectului. La fel, la tablourile restaurate se descoperă — sub acţiunea razelor ultraviolete — locurile restaurate.

În multe cazuri, metoda luminescenţei permite să se efectueze nu numai o analiză calitativă precisă, dar şi una cantitativă, fapt care are o importanţă deosebit de mare pentru o serie întreagă de ramuri ale tehnicii.

3. **Vederea nocturnă.** Dezvoltarea ştiinţei despre luminescenţă şi substanţele luminescente a permis să se rezolve problema vederii în întuneric, care cîndva părea cu totul imposibilă. La abordarea acestei probleme ştiinţifice dintre cele

mai serioase au participat mulţi învăţaţi şi au fost încercate suficient de multe metode. Cele mai reuşite s-au dovedit metodele care implicau folosirea, în acest scop, a luminofoarelor. Ca rezultat al unei munci de cercetare de mai mulţi ani, s-a reuşit să se elaboreze două metode diferite una de alta şi, pe baza lor, să se construiască aparate care permit vederea nocturnă.

Principiul de funcţionare al unui aparat de acest fel constă în următoarele. Razele infraroşii produse de un izvor special sînt îndreptate spre un obiect. Razele infraroşii invizibile reflectate de obiect sînt captate de un aparat, în care sînt transformate în radiaţii vizibile şi pe un ecran special apare o imagine clară.

Piesa principală şi cea mai importantă a unui asemenea aparat este un ecran fosforescent confecţionat dintr-un luminofor special. Tocmai pe acest ecran are loc transformarea radiaţiilor invizibile în radiaţii vizibile.

Fizicienii au învăţat să prepare substanţe fosforescente care, după o iluminare preliminară, încep să lumineze strălucitor numai după ce sînt iradiate cu raze infraroşii. Dacă dintr-un luminofor de acest fel se confecţionează un ecran fosforescent special, iar după aceea — în decursul unei perioade de timp oarecare — acesta este supus iradierii cu raze vizibile, întreaga energie a lumini incidente va fi înmagazinată în ecran. După o asemenea încărcare la lumină, ecranul fosforescent capătă proprietatea de a emite el însuşi lumină, şi anume deosebit de intens, sub acţiunea razelor infraroşii. Acest ultim fapt are un rol important la aparatele de vedere nocturnă.

Construcţia schematică a unui aparat de acest fel pentru vederea în obscuritate este următoarea.

Ecranul fosforescent este montat într-un sistem optic special, care reprezintă un grup de lentile destinate să proiecteze — pe suprafaţa ecranului — imaginea în raze infraroşii a obiectelor observate. Înainte de folosirea aparatului, ecranul este supus unei iradieri cu lumină, mai mult sau mai puţin îndelungată. După încărcarea la lumină, aparatul este gata pentru funcţionare.

Ecranul fosforescent, care s-a găsit la lumină pentru un timp oarecare, este gata în orice moment să cedeze înapoi, sub formă de lumină, energia primită anterior de el. Este numai necesar ca el să fie „iluminat" cu raze infraroşii.

Razele infraroşii reflectate de obiecte ajung la sistemul optic al aparatului, cu ajutorul căruia se proiectează pe ecran imaginea obiectelor respective.

Sub acţiunea razelor infraroşii, ecranul începe imediat să emită lumină, iar deoarece diferitele puncte ale ecranului sînt iradiate cu raze infraroşii de intensitate diferită, la rîndul lor aceste puncte ale ecranului vor radia raze vizibile de intensitate diferită, în deplină concordanţă cu forma şi aspectul obiectului, şi pe ecran va apărea imaginea lui. Acesta este principiul de funcţionare al dispozitivului pentru vedere nocturnă în care se foloseşte un ecran confecţionat dintr-un luminofor ce posedă proprietatea de a transforma radiaţiile infraroşii invizibile în radiaţii vizibile.

În afară de principiul descris, există şi altul, mai perfecţionat, bazat pe folosirea efectului fotoelectric exterior. În dispozitivele construite pe baza acestui principiu şi denumite traductoare electrono-optice (convertoare de imagini), rolul principal revine unei celule fotoelectrice şi unui ecran fluorescent.

După cum se ştie, substanţele fluorescente pot emite lumină proprie nu numai sub acţiunea unor raze vizibile. Fluorescenţa apare şi sub acţiunea razelor ultraviolete invizibile. Substanţa devine fluorescentă la fel de bine şi dacă ea este iradiată cu un flux de electroni. Această proprietate a substanţelor fluorescente şi-a găsit aplicaţii numeroase într-o serie întreagă de aparate electrice, inclusiv traductoarele electrono-optice.

Schematic, un traductor electro-optic are următoarea construcţie.

Se confecţionează un cilindru de sticlă cu pereţi dubli. Cilindrul are două funduri. Prin aspectul lui exterior, el poate fi comparat cu nişte pahare de diametre diferite, introduse unul în celălalt.

Pe fundul interior, aşa cum se arată în fig. 44, este depus un strat de substanţă fluorescentă — luminoforul. Pe fundul exterior, şi anume pe acea suprafaţă care este îndreptată spre ecranul fluorescent, sînt depuse două straturi metalice. Primul dintre ele este o peliculă semitransparentă de argint, prin care razele luminoase trec bine. Cel de-al doilea este un strat de cesiu extrem de fotosensibil la radiaţiile infraroşii.

Care este rolul celui de-al doilea fund, cu straturile de argint şi cesiu?

Fundul exterior al traductorului electrono-optic serveşte drept fotocatod.

„Lumina“ infraroşie incidentă pe fotocatod trece la început printr-un sistem optic alcătuit din lentile speciale transparente pentru razele infraroşii, apoi trece prin grosimea fundului de sticlă, după aceea traversează stratul extrem de subţire de argint, ajunge la pelicula de cesiu fotosensibilă şi smulge de acolo electroni, adică apare efectul fotoelectric obişnuit. Numărul electronilor eliberaţi este, fireşte, cu atît mai mare, cu cît lumina este mai intensă. Această proprietate a efectului fotoelectric permite să se rezolve radical problema vederii nocturne. Dacă nu ar exista această lege importantă, nu ar fi posibil, folosind un traductor electrono-optic, să se vadă în întuneric.

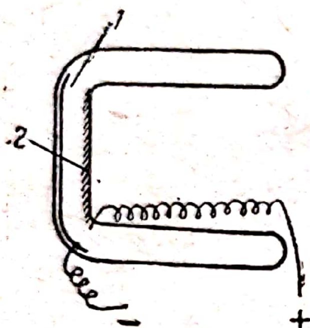


Fig. 44. Construcţia schematică a unui traductor electrono-optic (convertor de imagini):
1 — fotocatod, 2 — ecran fluorescent

Cum apare imaginea într-un asemenea aparat? Pentru ca ea să se ivească, este necesar ca obiectele observate să fie iradiate cu lumină infraroşie. Razele infraroşii reflectate de obiecte ajung la obiectivul aparatului, care proiectează pe fotocatod imaginea acestora în raze infraroşii. Ca urmare, apare efectul fotoelectric exterior, adică din fiecare punct al suprafeţei stratului de cesiu zboară electroni; în acest caz, numărul de fotoelectroni va fi strict proporţional cu intensitatea luminii incidente în punctul respectiv. Deoarece diferitele puncte ale suprafeţei fotocatodului sînt luminate cu raze de intensitate diferită, ca urmare a faptului că pe el se proiectează imaginea unor obiecte, rezultă că aceste puncte vor emite un număr diferit de electroni.

În mod obişnuit, sub acţiunea luminii, electronii zboară de la suprafaţa fotocatodului în toate direcţiile posibile. Pentru obţinerea unei imagini, acest lucru nu este convenabil şi este absolut necesar ca întreaga masă de electroni să se deplaseze pe nişte traiectorii liniare, perpendiculare pe suprafeţele fotocatodului şi ecranului fluorescent.

În acest scop, între suprafaţa stratului de cesiu şi ecranul fluorescent se creează un cîmp electric de înaltă tensiune: la fotocatod se conectează conductorul de la borna negativă a unei surse de tensiune, iar la ecran — de la cea pozitivă. Cîmpul electric puternic produs de o tensiune de cîteva mii de volţi obligă întreaga masă de electroni să se deplaseze pe

traiectorii drepte. Imaginea în raze infraroşii, proiectată pe fundul exterior al traductorului electrono-optic, produce o imagine electronică: din diferite puncte ale fotocatodului de cesiu zboară un număr diferit de electroni, proporţional cu intensitatea luminii. Imaginea electronică este transportată în întregime, fără a suferi deformări, pe ecranul fluorescent, pe care apare imaginea obiectului, strălucitoare şi clar vizibilă; acele puncte ale ecranului în care ajung un mare număr de electroni strălucesc mai puternic, iar celelalte puncte — supuse şocurilor unui număr mai mic de electroni — par mai întunecate şi, prin urmare, pe întregul ecran se va vedea clar imaginea obiectului.

Fireşte, aparatele pentru vedere nocturnă nu pot transmite culorile vii ale obiectelor ce ne înconjoară, însă scopul final — vederea în obscuritate deplină — poate fi atins cît se poate de bine cu ajutorul lor. Este evident că, pentru a vedea în întuneric complet, în afară de aparatul descris este necesar şi un proiector care „să ilumineze" spaţiul cu lumină infraroşie; numai atunci razele infraroşii reflectate de obiectele considerate, ajungînd la aparat, dau posibilitatea să se vadă porţiunea iluminată de el şi tot ce se găseşte în ea.

4. **Ecrane fluorescente.** În multe aparate ştiinţifice şi tehnice foarte importante, un rol mare revine unui ecran fluorescent. Adesea, una dintre condiţiile impuse materialului din care este confecţionat ecranul este ca timpul de fluorescenţă să fie cît mai scurt posibil, iar strălucirea — cît mai mare cu putinţă.

Ecranele fluorescente se folosesc pe scară foarte largă; de aceea ne vom limita la o descriere foarte succintă numai a aplicaţiilor lor mai importante.

a) *Radioscopia.* O parte inseparabilă a oricărei instalaţii de radioscopie, folosită pentru vederea prin transparenţă în interiorul corpurilor, este ecranul fluorescent. Trecînd prin piesa iradiată şi ajungînd la ecran, razele Roentgen îl obligă pe acesta să devină fluorescent. Intensitatea luminii emise de ecran, între anumite limite, este cu atît mai mare, cu cît intensitatea radiaţiilor Roentgen este mai mare. De aceea, iradiind un lingou metalic oarecare, cu ajutorul ecranului se pot descoperi golurile din interiorul lui. Aceasta se poate face deoarece, trecînd prin grosimea lingoului, razele Roentgen ajung la ecran atenuate. Gradul de atenuare a razelor va fi însă diferit, în funcţie de omogenitatea lingoului. Razele Roentgen nu sînt absorbite de goluri, de aceea, în dreptul

lor se vor vedea pe ecran pete mai strălucitoare decît în dreptul celorlalte părți ale lingoului.

Iradierea cu raze Roentgen se folosește tot atît de mult și în practica medicală. „Luminînd“ cu ele un om, medicul radiolog poate observa — cu ajutorul ecranului fluorescent — starea organelor interne. De exemplu, razele Roentgen permit să se determine cu mare precizie locul fracturilor coastelor și regiunile unde cineva a fost rănit cu gloanțe sau schije.

b) *Oscilograful catodic*. Partea principală a oscilografului catodic este tubul catodic cu ecran fluorescent. Un fascicul de electroni care se deplasează cu viteză mare ajunge la un ecran fluorescent și în acest loc apare un punct puternic strălucitor. Dacă fasciculul electronic nu „stă pe loc“, ci începe să parcurgă ecranul, el va trasa pe acesta linii diferite ca formă, care devin bine vizibile și reflectă caracterul proceselor studiate.

c) *Televiziunea*. Fără a analiza amănunțit principiul transmiterii imaginilor în televiziune, vom arăta numai că, în televiziune, îndeplinește o funcție esențială tubul videoreproductor cu ecran fluorescent (kinoscopul), pe care apare imaginea transmisă.

5. **Vopsele luminoase.** Substanțele fosforescente, precum și substanțele luminoase cu acțiune continuă reprezintă materiale care, practic, nu pot fi înlocuite cu nici un fel de alte materiale în majoritatea cazurilor.

Este cît se poate de natural faptul că substanțele luminoase și-au găsit vaste aplicații în armată și în tehnica militară.

Cifrele și indicativele tuturor aparatelor instalate la bordul avioanelor, tancurilor și automobilelor sînt acoperite cu o substanță fosforescentă cu acțiune continuă. În decursul tuturor zborurilor de noapte și în timpul deplasărilor, pilotul, tanchistul sau șoferul văd minunat de bine indicațiile aparatelor, chiar și în obscuritate completă.

În timpul ultimului război mondial, pe multe șosele supuse unui regim de camuflare totală, unele inscripții și tăblițe indicatoare, care arătau amplasarea unui adăpost sau unui punct de prim ajutor, erau scrise cu vopsea fosforescentă, ceea ce permitea populației să se orienteze repede în cazul unei alarme aeriene obișnuite.

Tunurile și mitralierele pot fi prevăzute cu vizoare acoperite cu o substanță fosforescentă. Pentru dislocarea în

secret în timpul nopţii, dintr-un punct în altul a tancurilor, tunurilor autopurtate şi altor mijloace militare, cu farurile acoperite, se folosesc semnale de stop fosforescente. Acestea sînt nişte discuri luminoase mici, acoperite cu vopsea fosforescentă. Un tanchist care merge în spate vede în faţa lui un cerc luminos, fixat pe partea posterioară a tancului care merge în faţă şi, datorită acestui fapt, conducătorul are posibilitatea să respecte distanţa necesară. Folosirea semnalelor de stop fosforescente a permis să se evite nenumărate accidente care se întîmplă în timpul deplasărilor nocturne ale coloanelor de tancuri şi automobile.

În condiţiile celei mai complete obscurităţi, cînd apare necesitatea de a se citi un ordin oarecare sau să se examineze harta terenului, se folosesc lupe speciale, a căror suprafaţă interioară este acoperită cu o substanţă fosforescentă cu acţiune continuă.

Cu vopsea fosforescentă se acoperă indicatoarele de pe şosele, din locurile periculoase, cele care arată locul de amplasare a punctului de prim ajutor pe cîmpul de luptă, aşezarea postului de comandă etc.

In războiul trecut, în multe ţări s-au folosit jetoane luminoase aruncate pe sol. In funcţie de lumina unui asemenea reper se poate observa apropierea infanteriei.

Fireşte, tot atît de numeroase sînt şi aplicaţiile paşnice ale vopselelor fosforescente în industrie.

13. TERMOELECTROGENERATOARE

In primul capitol al acestei cărţi s-a vorbit despre modul în care apare forţa termoelectromotoare într-un circuit format dintr-un semiconductor electronic şi unul cu goluri. Tot acolo s-a arătat că fenomenele termoelectrice permit să se realizeze transformarea energiei termice direct în energie electrică. In ciuda acestei particularităţi extrem de importante, termoelectricitatea a rămas — timp de mai mulţi ani — mai curînd un fenomen curios decît un factor important, capabil să contribuie la rezolvarea unor probleme energetice de mare amploare.

„Dintre marile descoperiri ale lui Oersted, Ampère şi Faraday, — scrie academicianul A. F. Ioffe — termoelectricitatea a atras atenţia numai în mică măsură. Ulterior, folosirea ei pentru măsurarea temperaturilor a rămas în umbră în comparaţie cu electromagneţii, maşinile electrice şi transfor-

matoarele. Ea a rămas astfel în anticamera fizicii". Această situaţie îşi găseşte explicaţia în faptul să randamentul termocuplurilor metalice este excesiv de scăzut. El se numără în sutimi şi numai în cazuri optime — în zecimi de procent. Această valoare atît de mică a randamentului este determinată în special de două cauze: cantitatea considerabilă de energie termică consumată inutil, aplicată lipiturii calde, şi valoarea mică a coeficientului de forţă termoelectromotoare.

Apariţia pe arena ştiinţei a semiconductoarelor, dintre care multe posedă proprietăţi termoelectrice remarcabile, a modificat radical situaţia. Analiza naturii fizice a substanţelor semiconductoare şi a posibilităţilor lor a inspirat academicianului A. F. Ioffe, acum aproximativ 25 ani, ideea posibilităţii de utilizare practică a fenomenului termoelectric pentru transformarea directă a energiei termice în energie electrică, cu un randament relativ mare. Ca rezultat al activităţii de două decenii şi jumătate a academicianului A. F. Ioffe şi a colaboratorilor lui, au fost studiate în amănunt legile fenomenelor termoelectrice la cele mai diverse substanţe semiconductoare, şi pe baza acestei activităţi pur ştiinţifice a fost posibil să se proiecteze şi să se construiască mai multe tipuri de termoelectrogeneratoare, adică aparate care realizează transformarea directă a energiei termice în energie electrică.

Unul dintre generatoarele de acest fel — generatorul ТГК-3, creat la Institutul de semiconductoare al Academiei de Ştiinţe a U.R.S.S., în colaborare cu Ministerul Telecomunicaţiilor al U.R.S.S., este fabricat încă de cîtiva ani de către întreprinderea „Termoelektroghenerator". Termoelectrogeneratorul ТГК-3 cu 20 elemente (un termoelectrogenerator de 3 W, cu petrol lampant) capătă energia termică necesară de la o lampă cu petrol „Molnia", şi este destinat să alimenteze receptoarele de baterie „Rodina-47", „Rodina-52", „Iskra", „Б-2" şi altele asemănătoare.

Înainte de a răspunde la întrebarea cum este alcătuit acest generator, este necesar să facem următoarea observaţie: dacă se alcătuieşte un circuit din două semiconductoare, unul electronic şi celălalt cu goluri, şi se închide acest circuit printr-un receptor oarecare de energie electrică, iar după aceea se creează între lipituri o diferenţă de temperatură, în circuit va apărea un curent termoelectric. În acest caz, curenţii termoelectrici I_{-} şi I_{+}, care apar în fiecare ramură separat, se adună formînd curentul I_0 al termocuplului, a cărui va-

loare este $I_0 = I_- + I_+$. Considerînd acest fenomen din punct de vedere al forței termoelectromotoare care apare la capetele cuplului, trebuie să menționăm că pentru acest exemplu este caracteristică și extrem de importantă împrejurarea că coeficientul de forță termoelectromotoare α_0 reprezintă suma coeficienților ce caracterizează ramura electronică și cea cu goluri, adică $\alpha_0 = \alpha_- + \alpha_+$. Atunci, forța termoelectromotoare totală E, care apare la capetele unui asemenea termocuplu, va avea valoarea

$$E = \alpha_0 (T_2 - T_1) = (\alpha_- + \alpha_+)(T_2 - T_1).$$

Conectînd în serie n termocupluri semiconductoare, este posibil ca pentru aceeași diferență de temperatură să se obțină o forță termoelectromotoare de n ori mai mare. Pe de altă parte, conectînd n termocupluri în paralel, se poate obține — la aceeași diferență de temperatură — un curent de scurtcircuit de n ori mai intens (rezistența circuitului exterior este foarte mică).

Tocmai pe baza acestui principiu a fost construit termoelectrogeneratorul ТГК-3 (fig. 45).

Dintr-o substanță semiconductoare specială se confecționează niște plăcuțe mici de formă dreptunghiulară. La părțile frontale ale acestor plăcuțe se presează niște sîrmulițe scurte, cu ajutorul cărora plăcuțele sînt conectate în serie, formînd două termobaterii. Toate lipiturile la care se aplică căldură sînt încălzite de gazele fierbinți ale lămpii cu petrol. Celelalte lipituri sînt răcite de aerul din cameră. Pentru crearea unei mari diferențe de temperatură, lipiturile răcite sînt legate la cele 28 de aripioare metalice ale radiatorului. Peste fitilul lămpii se așază, în locul sticlei obișnuite, o

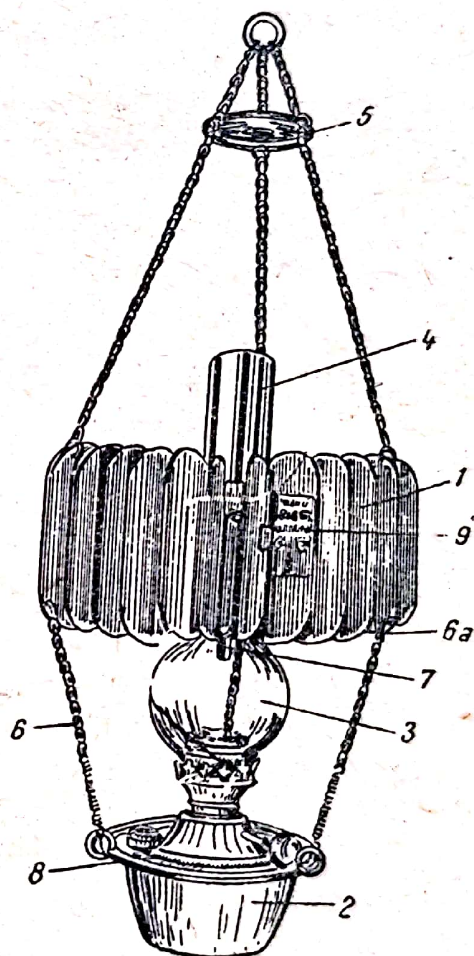


Fig. 45. Aspectul general al termoelectrogeneratorului ТГК-3:
1 — termoadaptor, 2 — lampă cu petrol, 3 — sticlă de lampă, 4 — tub metalic, 5 — dispozitiv de suspensie pentru termoadaptor, 6 — dispozitiv de suspensie pentru lampa cu petrol, 6a — lanț demontabil, 7 — încălzitor, 8 — inel de suspensie, 9 — plăcuțe cu borne

sticlă de lampă scurtată, fără partea ei cilindrică superioară. În deschizătura sticlei se introduce încălzitorul, la a cărui parte superioară este amplasat un tub metalic ce creează tirajul necesar pentru arderea lămpii. Termoelementele sînt amplasate radial în jurul încălzitorului şi anume în aşa fel, încît lipiturile lor exterioare vin în atingere cu aripioarele radiatorului, iar cele interioare — cu peretele fierbinte al încălzitorului. În cazul cînd lampa arde normal, temperatura lipiturilor interioare ale termoelementelor ajunge pînă la aproximativ 380°C, în timp ce temperatura lipiturilor exterioare nu depăşeşte 70—80°C. Dacă diferenţa de temperatură dintre lipiturile exterioare şi cele interioare este de 300°C se produce o forţă termoelectromotoare mai mult decît suficientă, care provoacă apariţia în circuit a unui curent care asigură din plin alimentarea radioreceptoarelor de tipurile indicate mai sus.

Atît partea anodică cît şi cea de încălzire ale termoelectrogeneratorului TГK-3 sînt formate dintr-un număr redus de termoelemente conectate în serie. Forţa termoelectromotoare dezvoltată de ele este absolut suficientă pentru circuitele de filament, dar nu este suficientă pentru alimentarea ano-

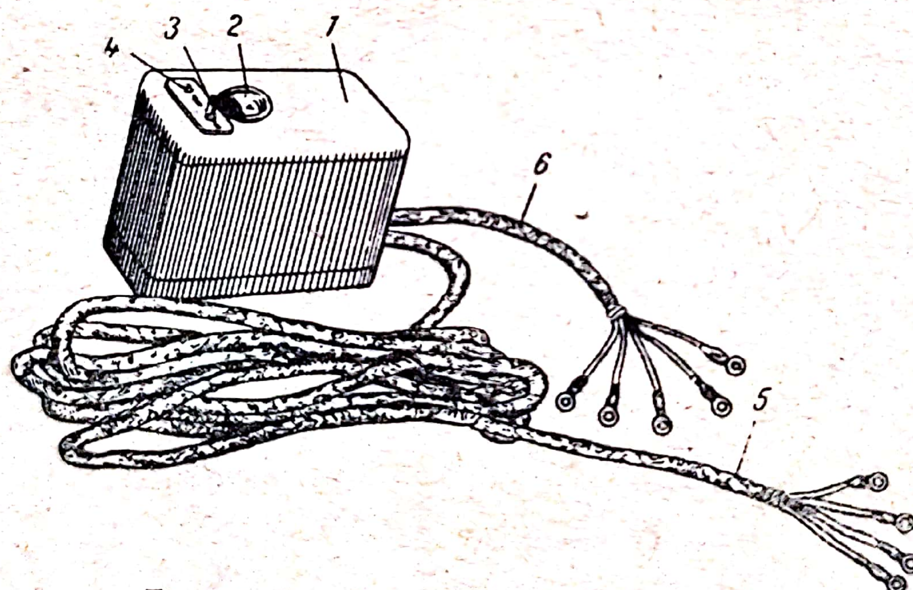


Fig. 46. Aspectul general al unui vibrator:
1 — carcasă, *2* — aparat de măsurat, *3* — întrerupător basculant, *4* — lampă de semnalizare, *5* — cordon de conectare la termoelectrogenerator, *6* — cordon de conectare la receptor

dică. De aceea, trebuie să se recurgă la ajutorul unui vibrator, un aparat care serveşte la transformarea unei tensiuni continue joase într-o tensiune continuă înaltă. Vibratorul, al cărui aspect exterior este arătat în fig. 46, este montat pe

un şasiu de dimensiuni mici, acoperit de un capac metalic. Pe partea superioară a capacului se amplasează un voltmetru, care serveşte în mod special la controlarea tensiunii circuitelor de filament, o lampă de semnalizare şi un întrerupător basculant destinat să conecteze şi să deconecteze vibratorul.

Dintr-un perete al cutiei vibratorului ies două cordoane, fiecare dintre acestea fiind format la rîndul lui din patru conductoare de culori diferite. Cordonul scurt (0,5 m) se conectează la radioreceptor, iar cel lung (5,5 m) serveşte la conectarea la regleta termoelectrogeneratorului.

Generatorul TГK-3 deserveşte mai multe tipuri de radioreceptoare, de aceea, pentru fiecare radioreceptor există o schemă de conectare proprie. În fig. 47 este reprezentată schema de conectare a receptorului „Rodina-47".

Bornele de ieşire ale celor două termobaterii sînt legate la cele cinci borne ale regletei. Două borne servesc la conectarea vibratorului, iar celelalte trei — la conectarea circuitelor de filament ale radioreceptorului. Termoelectrogeneratorul TГK-3, împreună cu dispozitivul de suspendare, are o înălţime de 1 000 mm, iar diametrul lui este de 300 mm. Greuta-

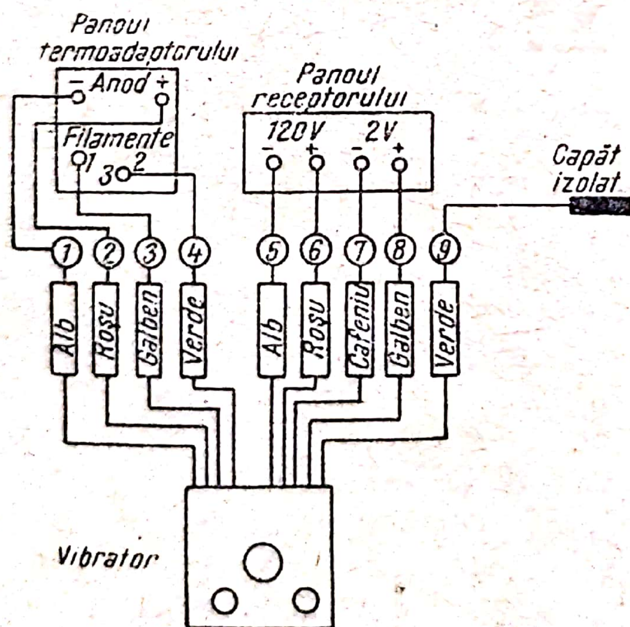


Fig. 47. Schema conectării termoelectrogeneratorului la receptorul „Rodina-47"

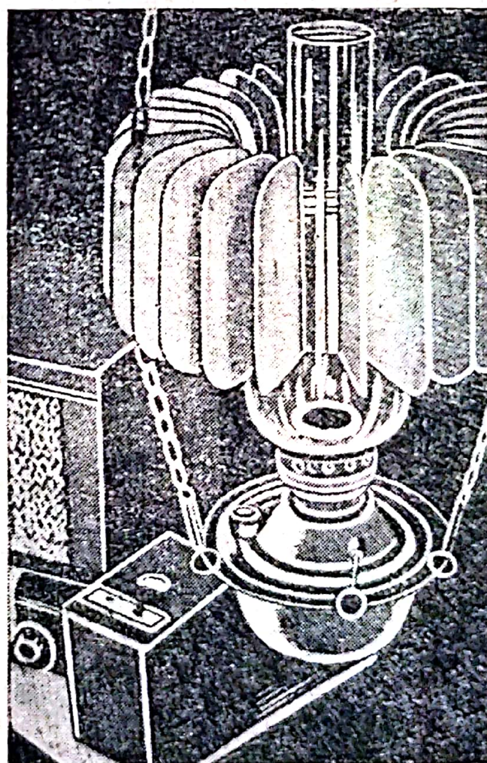


Fig. 48. Aspectul exterior al termoelectrogeneratorului TГK-3

tea lui, fără vibrator, este de 8 kg. Vibratorul împreună cu cordoanele de legătură cîntăreşte 3 kg şi are dimensiunile 189×132 mm. În fig. 48 este arătat aspectul exterior al termoelectrogeneratorului TГK-3, împreună cu receptorul şi vibratorul.

În rezervorul lămpii cu petrol „Molnia" cu 20 elemente, încap 3/4 l petrol. În cazul unui consum de combustibil de 60—70 g/h lampa încărcată complet cu petrol permite o funcţionare continuă de aproximativ 8 ore. Durata de serviciu a generatorului este de cel puţin 4 000 ore.

Nu este întîmplător faptul că termoelectrogeneratorul TГK-3 are drept sursă de căldură o lampă cu petrol. Prin aceasta se realizează două scopuri. Lampa cu petrol iluminează încăperea şi, simultan, oferă posibilitatea de a se asculta emisiunile de radio.

Termoelectrogeneratoarele TГK-3 şi-au găsit vaste aplicaţii în raioanele neelectrificate ale Uniunii Sovietice. Ele sînt de neînlocuit în condiţiile expediţiilor de explorare, în excursiile pe distanţe mari şi pot fi utile şi în cele mai diverse cazuri cînd nu există la dispoziţie surse de energie electrică.

Fabrica „Termoelektroghenerator" a început să livreze un model îmbunătăţit de generator TГK-2-2, care se deosebeşte de cel precedent prin faptul că nu conţine vibrator. Cele două termobaterii ale generatorului TГK-2-2 asigură în întregime alimentarea atît a circuitelor de filament ale radioreceptorului, cît şi a celor anodice.

La Institutul de semiconductoare a fost realizat încă un tip de termoelectrogenerator, TГУ-1, cu puterea de 15 W. care alimentează staţia de radio „Urojai", destinată SMT-urilor pentru comunicaţiile între brigăzile de tractoare. Energia termică necesară acestui generator este furnizată de un primus obişnuit cu petrol (fig. 49). Se efectuează lucrări de realizare şi a altor tipuri de termoelectrogeneratoare, deocamdată de putere mai mică. Cu toate acestea, încă de pe acuma ies clar în evidenţă perspectivele viitoare. Nu există nici un fel de îndoială că în viitorul apropiat, fizicienii în colaborare cu tehnicienii vor crea termoelectrogeneratoare de mare putere cu semiconductoare, cu durata de serviciu îndelungată şi cu un randament înalt. Cît de repede se va întîmpla aceasta? Este dificil să se facă previziuni, chiar dacă acestea se bazează pe fundamentul solid al faptelor ştiinţifice. Este limpede doar un singur lucru: o problemă

care pînă nu de mult părea fantastică şi irealizabilă, va fi fără îndoială soluţionată. Viitoarele termoelectrogeneratoare cu semiconductoare, fireşte, nu vor înlocui absolut toate cele-

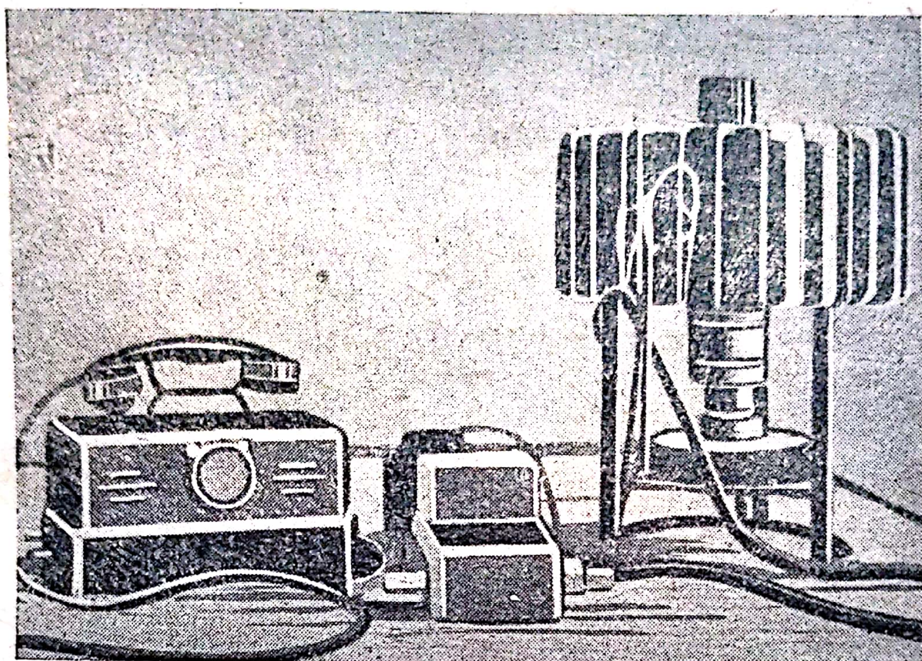


Fig. 49. Termoelectrogeneratorul TГY-1 cu staţia de radio „Urojai"

lalte surse de curent, dar ele se vor răspîndi pe scară largă şi vor căpăta extrem de multe aplicaţii.

14. INSTALAŢII DE RĂCIRE TERMOELECTRICE

În strînsă legătură cu problema pe care tocmai am examinat-o este şi o altă problemă tehnică, de asemenea extrem de importantă: obţinerea pe cale termoelectrică a frigului. Aceasta se bazează pe un fenomen descoperit încă în 1834 de către fizicianul francez Jean Peltier.

Coeficientul lui Peltier, *P*, este proporţional cu coeficientul de forţă termoelectromotoare α, iar acesta din urmă are la semiconductoare o valoare mai mare decît la metale. Acest fapt important a permis academicianului A. F. Ioffe să atragă atenţia cercetătorilor asupra posibilităţii de obţinere a frigului prin intermediul efectului Peltier în semiconductoare. Unora li se părea că această idee se sprijină pe o supraapreciere a semiconductoarelor, că ea nu poate fi justificată de consideraţii care se bazează pe un fond de fapte

riguroase și logice. Această neîncredere în ideea emisă s-a transformat însă repede în convingerea certă că ea poate fi realizată practic, convingere care a apărut după ce A. F. Ioffe a creat teoria instalațiilor termoelectrice cu semiconductoare și a demonstrat că, folosind în acest scop semiconductoare cu parametri electrici corespunzători, se poate rezolva cu succes problema propusă.

La baza construcției unei instalații termoelectrice cu semiconductoare se găsesc aceleași principii care se folosesc într-un termoelectrogenerator și anume funcțiunile principale ale unei asemenea instalații sînt îndeplinite de o baterie de termoelemente care este alcătuită în modul următor: din semiconductoare cu proprietățile termoelectrice necesare se confecționează diferite elemente, de exemplu de formă paralelipipedică. După aceea, un element cu mecanism de conducție electronic este conectat — cu ajutorul unei plăcuțe metalice — în serie cu un element care posedă conducție prin goluri. Acest element, la rîndul lui, se conectează cu un al treilea element, de data aceasta electronic; al treilea element se conectează cu un al patrulea, al patrulea cu al cincilea etc. Se realizează în felul acesta o conectare în serie de semiconductoare electronice și cu goluri, care alternează. Se obține o coloană alcătuită dintr-un număr oarecare de elemente (fig. 50). Din considerații pur constructive, mai multe coloane de acest fel se conectează în serie. Ca rezultat se obține o baterie formată dintr-un număr relativ mare de elemente (fig. 51).

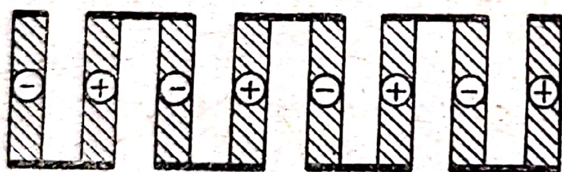


Fig. 50. Coloană refrigeratoare termoelectrică, alcătuită din elemente semiconductoare electronice și cu goluri care alternează unele cu altele

Menționăm totuși că nu totdeauna și nu în toate cazurile este necesară tocmai o baterie de acest fel, compusă dintr-un număr mare de elemente. Există, de exemplu, instalații de răcire care constau numai dintr-un singur termoelement.

Cînd prin baterie circulă un curent electric, un sistem de lipituri se răcește, pe cînd celălalt se încălzește. Dacă inversăm sensul curentului, primul sistem se va încălzi, iar cel de al doilea se va răci. După cum se va arăta în cele ce urmează, această proprietate a bateriei termoelectrice — dega-

jarea sau absorbirea de căldură în aceeaşi porţiune a ei, în funcţie de sensul curentului — joacă un rol extrem de important.

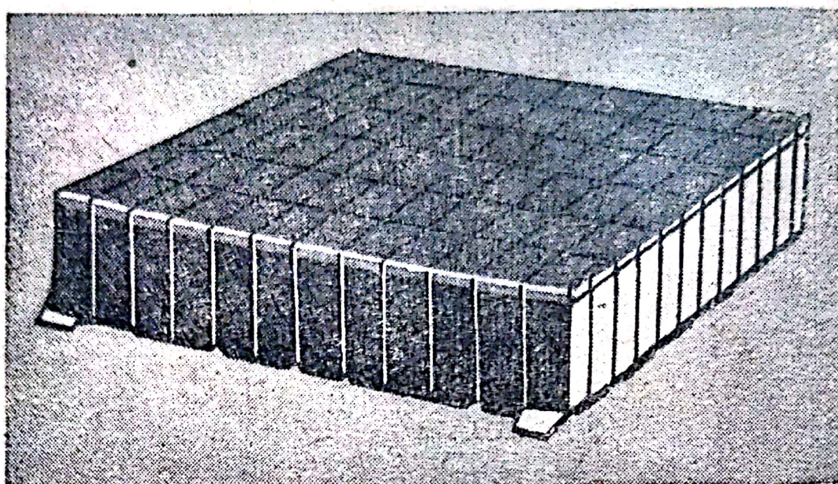


Fig. 51. Baterie de răcire termoelectrică

Parametrul esenţial ce caracterizează eficacitatea unei baterii termoelectrice este coeficientul frigorific K, egal cu raportul dintre puterea termică Q_0 absorbită de lipiturile reci, şi puterea electrică W necesară. Cu alte cuvinte, coeficientul K caracterizează rentabilitatea energetică a instalaţiei care produce frig, adică în esenţă nu reprezintă altceva decît randamentul. Teoria elaborată de A. F. Ioffe arată că în cazul unei anumite diferenţe de temperatură între lipiturile calde şi cele reci, coeficientul K este determinat în întregime de mărimea

$$Z = \frac{\alpha^2\sigma}{\varkappa}$$

unde α este coeficientul de forţă termoelectromotoare, σ — conductivitatea electrică, iar $\varkappa$ — coeficientul de conductibilitate termică. La toate metalele, fără excepţie, α are o valoare extrem de mică, iar $\varkappa$ — dimpotrivă — o valoare extrem de mare. De aici rezultă, evident, că coeficientul frigorific mare al instalaţiei de răcire termoelectrice poate fi obţinut numai dacă în acest scop se folosesc semiconductoare, nu metale. Se înţelege că pentru crearea unei instalaţii frigorifice termoelectrice eficace este necesar să se folosească numai substanţe semiconductoare la care coeficientul z are o valoare cît mai mare posibilă. Nivelul actual al tehnologiei fabricării substanţelor pentru termoelemente permite să se creeze ter-

mobaterii care, funcţionînd fără sarcină termică, realizează micşorarea temperaturii cu 60°C. Dacă lipiturile calde, de exemplu, se găsesc la temperatura camerei (+20°C), temperatura lipiturilor reci — dacă se respectă anumite condiţii — poate atinge — 40°C. În multe cazuri, micşorarea temperaturii cu 60°C este insuficientă şi este necesară o răcire încă şi mai puternică. Atunci trebuie să se recurgă la folosirea unei baterii cu mai multe etaje; din punct de vedere constructiv, aceasta se realizează în modul următor. Se confecţionează mai multe baterii, să zicem trei. Fiecare baterie, din punct de vedere electric, este cu totul independentă şi funcţionează fără legătură cu celelalte. Apoi, aceste trei baterii se pun în contact una cu alta, în aşa fel încît între ele să se creeze un contact termic cît mai bun posibil. Aceasta se poate realiza, de exemplu, în modul următor: toate cele trei baterii se aşază una peste alta (fig. 52). Între ele se aşază plăci despărţitoare subţiri care posedă proprietăţi electroizolante bune, dar care — în acelaşi timp — conduc bine căldura. Prin acest procedeu, lipiturile reci ale primei baterii (cea de jos) răcesc lipiturile fierbinţi ale celei de-a doua, iar lipiturile reci ale celei de-a doua baterii răcesc lipiturile calde ale celei de-a treia. Cînd prin fiecare dintre baterii trece un curent electric, căderea totală de temperatură a bateriei cu trei etaje se va compune din căderile de temperatură produse de fiecare baterie.

La prima privire s-ar părea că o mărire considerabilă a numărului de etaje ar putea duce la o micşorare însemnată a temperaturii lipiturilor reci ale ultimei baterii. Totuşi, din nefericire, nu se întîmplă astfel, deoarece fiecare etaj următor produce o micşorare din ce în ce mai redusă a temperaturii. Pentru obţinerea unor temperaturi mai scăzute este raţional să se folosească termobaterii cu maximum trei etaje.

Metoda termoelectrică de răcire prezintă o serie întreagă de avantaje. Unul dintre ele constă în posibilitatea realizării unei reglări line a temperaturii lipiturilor reci prin variaţia intensităţii curentului care trece prin termoelemente. O dată cu creşterea intensităţii curentului, cantitatea de căldură Q, absorbită de lipiturile reci din cauza efectului Peltier, se măreşte şi, în consecinţă, temperatura lor se micşorează; dimpotrivă, scăderea intensităţii curentului duce la egalizarea temperaturilor lipiturilor calde şi reci. Prin urmare, alegînd diferite valori ale intensităţii I a curentului, se pot obţine diferite grade de răcire. Ce e drept, această posibili-

tate este limitată: mărind peste măsură intensitatea curentului, nu se poate obține totuși o răcire oricît de mare. Aceasta se explică prin faptul că pe lîngă absorbirea și degajarea de căldură prin efect Peltier la lipiturile circuitului termoelectric, în acesta se degajă și căldură prin efect Joule. Cantitatea de căldură Q, provenită din efectul Peltier este proporțională cu prima putere a intensității I a curentului, adică $Q = PIt$, în timp ce cantitatea de căldură A — degajată prin efect Joule — este proporțională cu pătratul intensității curentului:

$$A = I^2Rt.$$

Pentru obținerea unei răciri maxime este necesar să se aleagă valoarea optimă I_{opt} a intensității curentului electric, care poate fi ușor calculată. Dacă prin baterie trece însă un curent mai mare ca valoare decît I_{opt}, gradul de răcire se va micșora, iar pentru $I \gg I_{opt}$ se va transforma în încălzire.

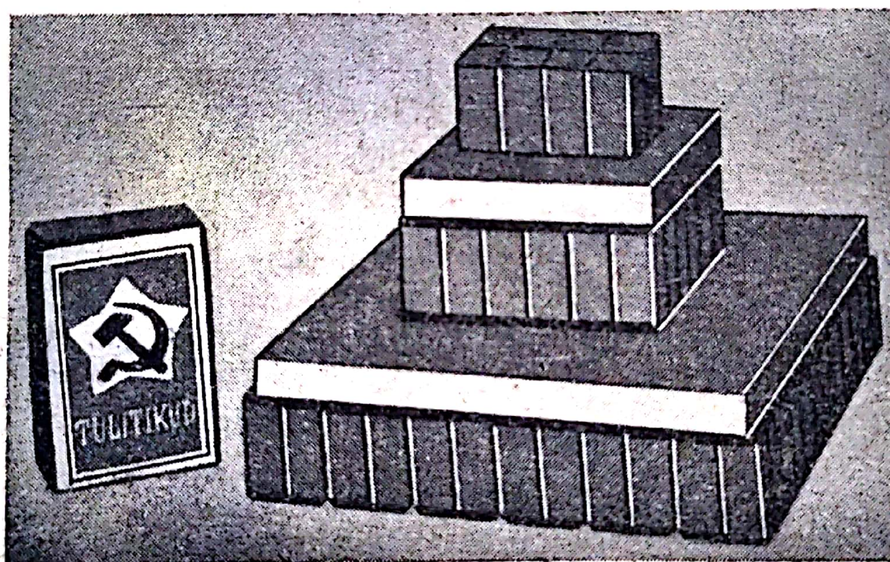


Fig. 52. Baterie termoelectrică cu trei etaje (la stînga, pentru comparație, o cutie de chibrituri)

Acestea sînt, foarte succint, principiile esențiale pe care se bazează construcția bateriilor de răcire termoelectrice.

Instalațiile frigorifice cu semiconductoare de-abia acum încep să-și facă drum în știință, în tehnică și în viața de toate zilele. Avantajele lor în comparație cu frigiderele obișnuite sînt atît de evidente, încît, într-un viitor nu prea îndepărtat, ele vor deține monopolul în toate domeniile unde se folosesc instalații frigorifice de putere mică.

Curînd după ce a fost elaborată tehnologia fabricării substanţelor semiconductoare cu proprietăţi termoelectrice bune au fost întreprinse încercări de creare a unor frigidere casnice cu semiconductoare. De rezolvarea acestei probleme s-au ocupat mai multe organizaţii, în frunte cu Institutul de semiconductoare din Leningrad al Academiei de Ştiinţe a U.R.S.S., care a creat mai multe tipuri de frigorifere casnice, destinate păstrării alimentelor. La baza fiecărei construcţii se află unul şi acelaşi principiu: toate lipiturile care se răcesc ale bateriei termoelectrice se amplasează în interiorul cavităţii frigiderului, iar lipiturile care se încălzesc sînt scoase în afară. Atît unul cît şi celălalt sistem de lipituri sînt în contact cu nişte radiatoare metalice. Radiatoarele legate direct la lipiturile reci ale termobateriei absorb căldura din spaţiul interior al frigiderului. Radiatoarele legate la lipiturile calde sînt aşezate pe partea exterioară a peretelui din spate al frigiderului şi sînt destinate special să preia şi să disipe căldură. În fig. 53 este arătat aspectul exterior al unui fri-

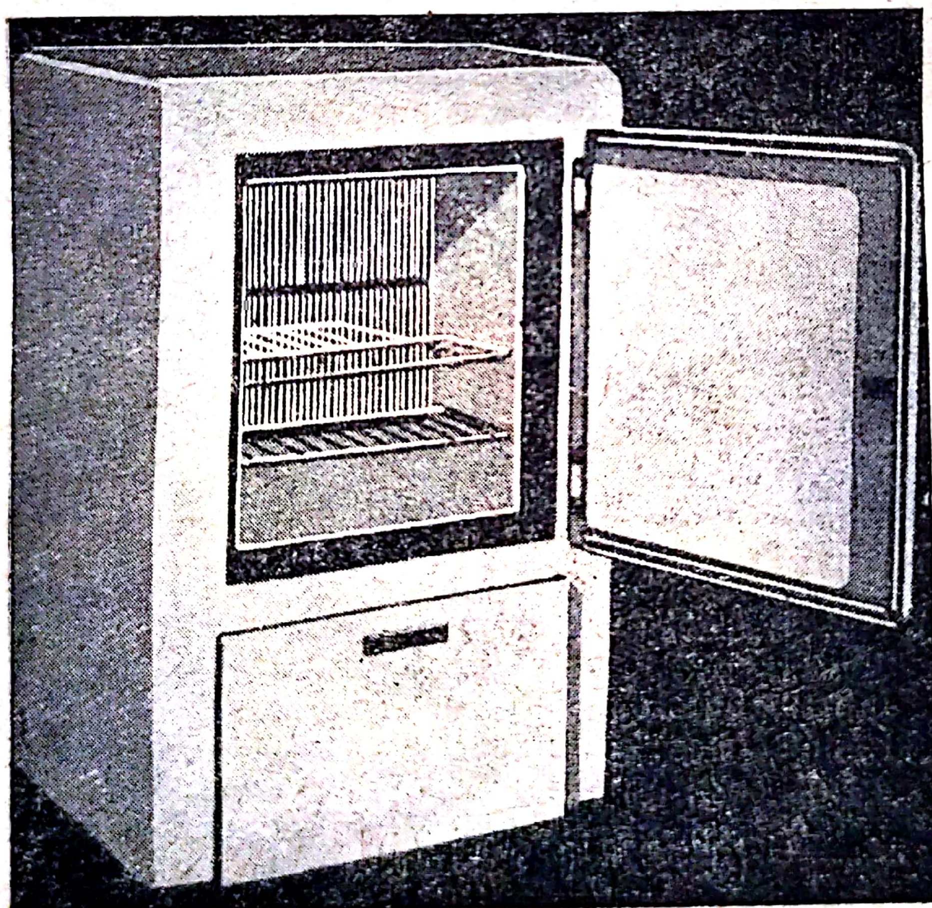


Fig. 53. Frigider casnic termoelectric. Înăuntrul dulapului se văd radiatoarele în contact cu lipiturile reci ale termobateriei

gider termoelectric cu capacitatea de 40 l, construit de Institutul de semiconductoare împreună cu Fabrica nr. 2 din Leningrad a Direcției Industriei Locale a Lengorispolkom. La același institut au fost realizate și alte construcții de frigidere casnice. Dintre acestea trebuie menționată în mod deosebit construcția elaborată de inginerul A. N. Voronin (fig. 54). Ea se deosebește de alte construcții prin faptul că înseși elementele au forma unor discuri cu un orificiu la mijloc. Elementele sînt conectate în așa fel, încît toate orificiile să ajungă unul în dreptul celuilalt și, ca rezultat, în interiorul unei asemenea coloane se formează un canal. Toate generatoarele elementelor în formă de discuri constituie lipituri reci, iar lipiturile interioare sînt cele calde. Pentru preluarea căldurii, prin canal se face să circule apă curgătoare de la o conductă.

Această construcție a permis să se micșoreze considerabil cantitatea de substanțe semiconductoare, reducînd-o pînă la 150 g.

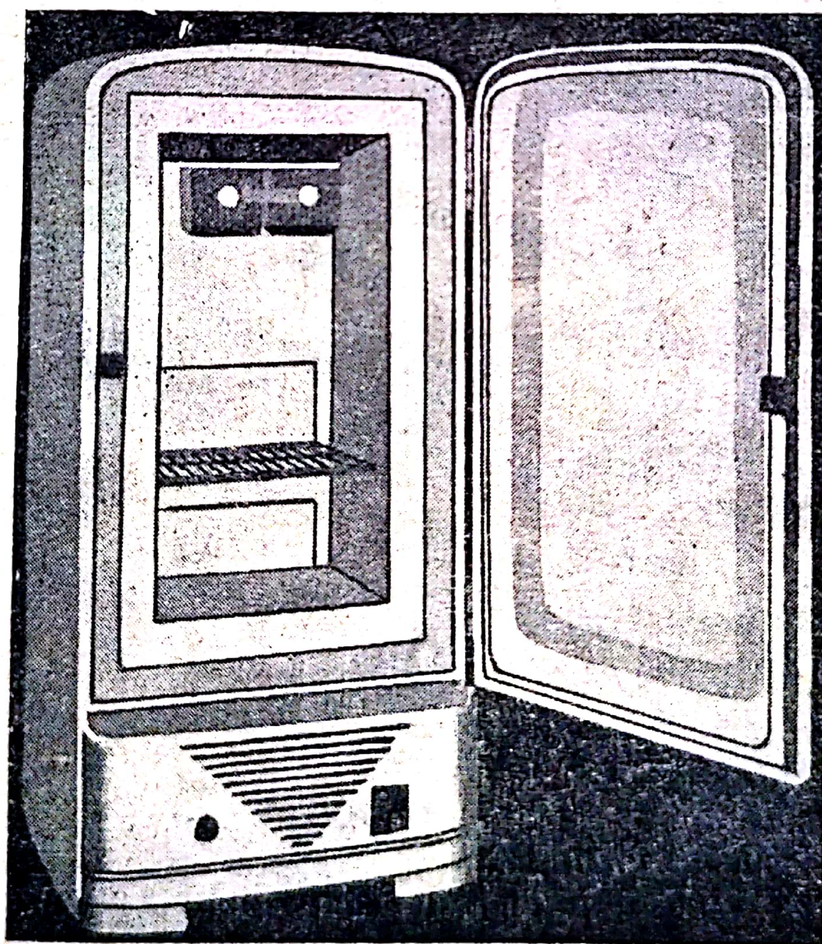


Fig. 54. Frigider cu semiconductoare, răcit cu apă

Care sînt avantajele frigiderelor termoelectrice în comparaţie cu cele obişnuite? Avantajele principale constau în faptul că, spre deosebire de instalaţiile cu compresor, frigiderele cu semiconductoare nu au nici un fel de piese mobile, se fabrică simplu şi, în fine, ceea ce este principal, durata lor de serviciu este practic infinită. Termoelementelor cu semiconductoare care funcţionează la temperaturi apropiate de temperatura camerei nu li se poate întîmpla nimic şi dacă cu un asemenea frigider se procedează cu atenţie, el va putea fi folosit foarte mult timp.

Proprietăţile termoelectrice bune ale semiconductoarelor permit ca ele să fie folosite pentru crearea celor mai diverse tipuri de instalaţii frigorifice destinate păstrării produselor. Instalaţii de acest fel, de exemplu, pot fi amplasate la bordul autocisternelor care transportă lapte sau băuturi răcoritoare, în vagoanele frigorifere, la bordul vapoarelor, în elevatoare, la bordul avioanelor, pretutindeni unde este necesar frigul şi unde există surse de curent continuu.

Spre deosebire de toate celelalte tipuri de instalaţii frigorifice, frigiderele cu semiconductoare pot fi destul de mici în ce priveşte dimensiunile lor. Ultima împrejurare, în numeroase cazuri, are o importanţă excepţională, permiţînd să se rezolve radical multe probleme ştiinţifice şi tehnice esenţiale. Vom da cîteva exemple. Sensibilitatea anumitor fotorezistenţe creşte puternic o dată cu scăderea temperaturii lor. Dimensiunile fotorezistenţelor nu sînt mari. In mod obişnuit suprafaţa lor fotosensibilă este mai mică decît un centimetru pătrat Se înţelege că este excesiv de incomod şi nerentabil să se răcească asemenea dispozitive mici prin procedeele obişnuite. Un microfrigider cu semiconductoare rezolvă însă această problemă cît se poate de simplu. Aici chiar cuvîntul „frigider“ este prea pretenţios, deoarece întregul aparat constă din maximum două termoelemente, la ale căror lipituri reci sînt aşezate fotorezistenţele (fig. 55).

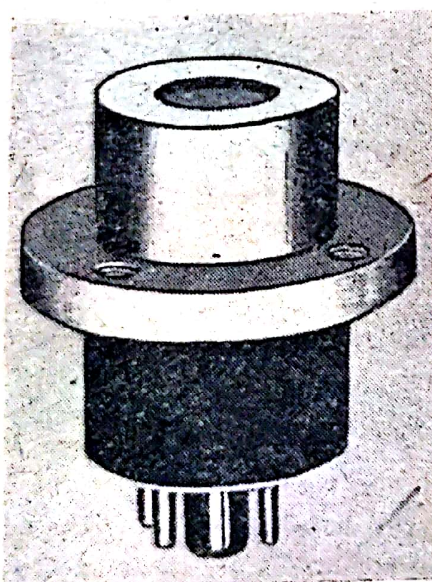


Fig. 55. Aspectul general al unui microfrigider pentru răcirea şi păstrarea la temperatură constantă a fotorezistenţelor

Un rol important au în tehnică şi multiplicatoarele fotoelectronice. În majoritatea domeniilor unde sînt folosite, multiplicatoarele fotoelectronice își îndeplinesc bine funcțiunile lor. În unele cazuri, însă, aşa-numitul „zgomot de fond", suprapus peste fotocurent, micşorează considerabil calitatea măsurărilor. Pentru micşorarea zgomotului de fond, catodul multiplicatorului fotoelectronic trebuie răcit cu cîteva zeci de grade. Aceasta se realizează în modul cel mai simplu şi mai uşor cu ajutorul unui microfrigider cu semiconductoare (fig. 56). În acest caz el este confecționat sub forma unui cilindru metalic, pe fundul căruia sînt montate termoelemente cu semiconductoare. În interiorul cilindrului-frigider se amplasează multiplicatorul fotoelectronic. Catodul acestuia aderă relativ bine la fundul cilindrului, datorită cărui fapt se asigură micşorarea necesară a temperaturii catodului.

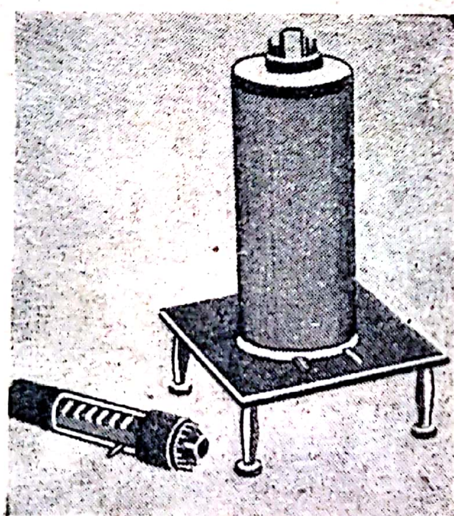


Fig. 56. Microfrigider pentru răcirea şi păstrarea la temperaturi constante a multiplicatoarelor fotoelectronice (dreapta) şi un multiplicator fotoelectronic (stînga)

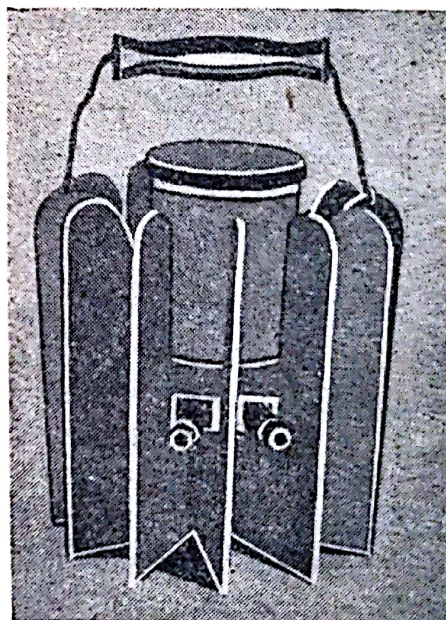


Fig. 57. Microfrigider pentru transportarea preparatelor biologice (una dintre primele variante)

Cu ajutorul microfrigiderelor se rezolvă o problemă atît de importantă cum este răcirea preparatelor biologice în timpul transportării lor cu mijloace neadaptate acestui scop: automobile, autobuze, vagoane de cale ferată obişnuite, cargoboturi etc.

Cînd apare necesitatea să se transporte dintr-un punct în altul, în timpul verii, un preparat oarecare, uşor alterabil, acesta trebuie răcit. În modul cel mai simplu şi mai uşor, această operaţie se înfăptuieşte cu ajutorul unui microfrigider cu semiconductoare. În acest caz, microfrigiderul are forma unui cilindru metalic cu pereţi dubli. Spaţiul dintre pereţi este umplut cu un material termoizolant. În interiorul cilindrului se introduce un recipient cu preparatul ce urmează a fi transportat. Termoelementele sînt montate pe fundul cilindrului. Frigiderul primeşte alimentarea necesară de la un acumulator. În timpul transportării cu automobile, se poate folosi acumulatorul propriu al automobilului. În fig. 57 este arătat un microfrigider pentru preparate biologice.

În practica cercetărilor histologice unul dintre cele mai importante aparate de laborator este microtomul, un aparat cu ajutorul căruia se pregătesc secţiuni subţiri de ţesuturi vii. În U.R.S.S., microtomurile sînt fabricate de uzina de instrumente medicale din Harkov.

Pentru a face o secţiune subţire, cu grosimea de cîţiva microni, ţesutul care se găseşte pe măsuţa microtomului trebuie îngheţat. Gradul de îngheţare este determinat de felul ţesutului. Acest ultim fapt necesită o temperatură strict determinată şi constantă. Atît supraîngheţarea cît şi subîngheţarea duc la imposibilitatea obţinerii unei secţiuni de bună calitate.

La sistemele de microtomuri existente, micşorarea temperaturii ţesutului se realizează cu ajutorul unui balon cu bioxid de carbon, care se găseşte la o presiune de 150 at. Bioxidul de carbon se aplică printr-un furtun special, care are un capăt legat la robinetul balonului, iar celălalt la cavitatea mică a microtomului. Pe capacul superior al cavităţii se aşază ţesutul. Ieşind din balon şi intrînd în cavitatea-măsuţă, bioxidul de carbon răceşte ţesutul, care este supraîngheţat cu bună ştiinţă. După aceea, operatorul aşteaptă un timp oarecare pînă cînd temperatura ţesutului se măreşte întrucîtva, pentru a face o secţiune de bună calitate. Momentul necesar este determinat prin pipăit, fără ajutorul unor aparate de măsurat. Se înţelege că alegerea momentului potrivit pentru efectuarea secţiunii este condiţionat în special de experienţa operatorului: un om de ştiinţă începător greşeşte adesea.

Din descrierea succintă a procedeului de îngheţare a ţesuturilor pe măsuţa microtomului rezultă clar că acest procedeu

prezintă numeroase dezavantaje esențiale. În primul rînd el este greoi, deoarece necesită existența obligatorie în laborator a unui balon greu de oțel, a cărui greutate este cu ceva mai mică decît 100 kg, și păstrarea în ordine a furtunului de durit și a reductorului. Este necesar ca balonul să fie umplut periodic cu bioxid de carbon, adică el trebuie să fie trimis la fabrică și adus din nou înapoi. Este cît se poate de evident că folosirea bioxidului de carbon devine deosebit de incomodă în condiții nestaționare, de exemplu în condiții de campanie, unde transportarea baloanelor cu bioxid de carbon este îngreuiată excesiv de mult din cauza distanțelor mari. La aceasta trebuie să se adauge că nu există pretutindeni fabrici care să producă bioxid de carbon și, din această cauză, în orașele mici — neindustriale — operațiile cu microtomul se efectuează printr-un procedeu încă și mai complicat decît înghețarea.

Al doilea dezavantaj, extrem de important, constă în faptul că înghețarea țesuturilor prin procedeul descris elimină posibilitatea reglării temperaturii, deși această operație este deosebit de necesară.

Dezavantajele menționate au dus la necesitatea de a se căuta metode de înghețare a țesuturilor care, pe de o parte, să fie simple și sigure, iar pe de altă parte, să permită asigurarea controlului și reglării temperaturii. O asemenea construcție de microtom cu măsuță frigorifică a fost realizată la Institutul de semiconductoare din Leningrad al Academiei de Științe a U.R.S.S.

Răcirea se realizează cu ajutorul unei baterii termoelectrice semiconductoare, de dimensiuni mici, compusă din numai patru termoelemente. Bateria este amplasată direct pe măsuță și anume în așa fel, încît lipiturile care se răcesc sînt îndreptate înspre exterior, iar cele care se încălzesc — înspre interior. La conectarea termoelementelor într-un circuit de curent continuu, lipiturile exterioare încep să se răcească. Reglînd intensitatea curentului electric se poate obține un grad diferit de răcire a lipiturilor, prin urmare și a țesuturilor care se așază direct pe ele. Pe suprafața măsuței se fixează, în caz de necesitate, un microtermistor semiconductor, în formă de sferă, care permite să se măsoare temperatura cu un mare grad de precizie. Gradul de răcire necesar pentru țesut se obține după trecerea a 4—5 minute de la aplicarea curentului electric.

11 — Seficonductorii — c. 1964.

In condiţiile staţionare din spitale, clinici sau institute de cercetări ştiinţifice, alimentarea măsuţei frigorifice a microtomului poate fi realizată de la o reţea de iluminat obişnuită, prin intermediul unui redresor cu seleniu tipic, de marca BCA-10. În condiţii de campanie sau în localităţile neelectrificate, energia electrică poate fi obţinută de la orice acumulator de automobil. Puterea absorbită de măsuţă nu este mare şi în cazul unei intensităţi de circa 10 A a curentului are o valoare de numai 2 W. Durata de serviciu a bateriei însăşi este practic nelimitată şi dacă ea nu este expusă unor deteriorări mecanice nu trebuie schimbată niciodată.

Microtomul cu măsuţă răcită pe cale termoeletrică permite să se facă secţiuni cu grosimea pînă la 2 μ.

Măsuţa de răcire este realizată constructiv în aşa fel, încît ea să poată fi montată pe un microtom obişnuit, de felul celor confecţionate la fabrica de instrumente medicale din Harkov, demontînd în prealabil de la acesta măsuţa răcită cu bioxid de carbon. În fig. 58 este reprezentat aspectul general al unui asemenea microtom cu măsuţă răcită termoelectric.

Microtomul a trecut cu succes prin diferite încercări, în timpul cărora au ieşit în evidenţă calităţile lui.

În practica cercetărilor microscopice apare adesea necesitatea de a se studia obiecte care se găsesc în diferite condiţii de temperatură. Cum să se rezolve o astfel de problemă ? Metodele obişnuite permit relativ simplu să se mărească temperatura preparatului, însă în ce priveşte răcirea lui, aceasta se realizează cu preţul folosirii unor mijloace voluminoase şi puţin comode. Folosirea în acest scop a termoelementelor cu semiconductoare a simplificat în mare măsură problema şi a dat posibilitatea să se construiască şi să se realizeze o măsuţă de microscop cu încălzire şi răcire termoelectrică. Ideea acestei construcţii se bazează pe faptul că, în funcţie de sensul curentului electric care trece printr-un circuit format din

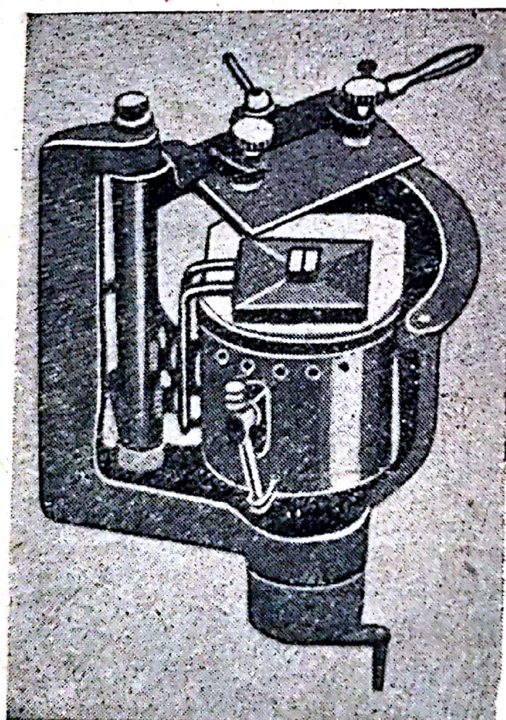


Fig. 58 Microtom cu măsuţă răcită termoelectric

termoelemente, sistemul de lipituri respectiv sau se răcește, sau — dimpotrivă — se încălzește.

Formatul constructiv al măsuței pentru microscop este arătat în fig. 59. Măsuța este confecționată în așa fel, încît ea să poată fi montată la orice tip de microscop. La mijlocul măsuței, așa cum se arată în fig. 59, s-a făcut un orificiu pentru ca preparatul să poată fi examinat nu numai în lumină reflectată, dar și prin transparență.

Pentru a se micșora temperatura preparatului sau, invers, pentru a o putea mări, este necesar să se inverseze sensul curentului care circulă prin termoelemente, cu ajutorul unui comutator special. Reglînd intensitatea curentului, se pot obține diferite temperaturi între limitele de la —10 pînă la + 70°C.

Măsuța absoarbe în total numai o energie electrică de 2 W la un curent de 12 A. Diametrul ei este de 80 mm, iar înălțimea — de 10 mm.

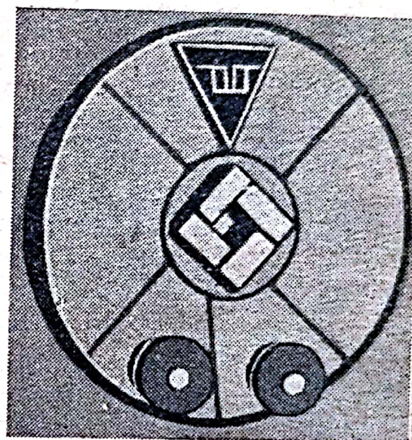


Fig. 59. Măsuță pentru microscop cu încălzire și răcire termoelectrică

Metoda termoelectrică de „producere“ a frigului și-a găsit aplicații și în scopuri meteorologice. Vom da numai un singur exemplu: Institutul de semiconductoare, împreună cu Observatorul geofizic principal A. I. Voeikov, a proiectat și construit un higrometru termoelectric. Principiul de funcționare al acestui aparat se bazează pe faptul că un termoelement răcește o oglindă mică pe care cade — de la un corp de iluminat special — un fascicul îngust de lumină, reflectat apoi pe suprafața unei celule fotoelectrice. Intr-un moment oarecare, cînd temperatura oglinjoarei se va micșora în mod corespunzător, pe suprafața ei vor apărea vapori condensați, ea va deveni neclară și intensitatea fasciculului luminos reflectat se va micșora considerabil, fapt care va fi perceput practic instantaneu de circuitul celulei fotoelectrice. Temperatura suprafeței oglinjoarei se măsoară cu un termocuplu special cu semiconductoare. Aparatul corespunzător este etalonat direct în unități de conținut de umiditate. In fig. 60 este arătat aspectul exterior al higrometrului de condensare.

La Institutul de semiconductoare au fost imaginate încă o serie întreagă de alte tipuri de microfrigidere destinate a fi folosite în cele mai diferite domenii ale științei și tehnicii.

Reversibilitatea efectului Peltier a permis să se rezolve, cu ajutorul microfrigiderelor, încă o problemă interesantă și extrem de importantă. Se știe că înlocuitoarele tuburilor

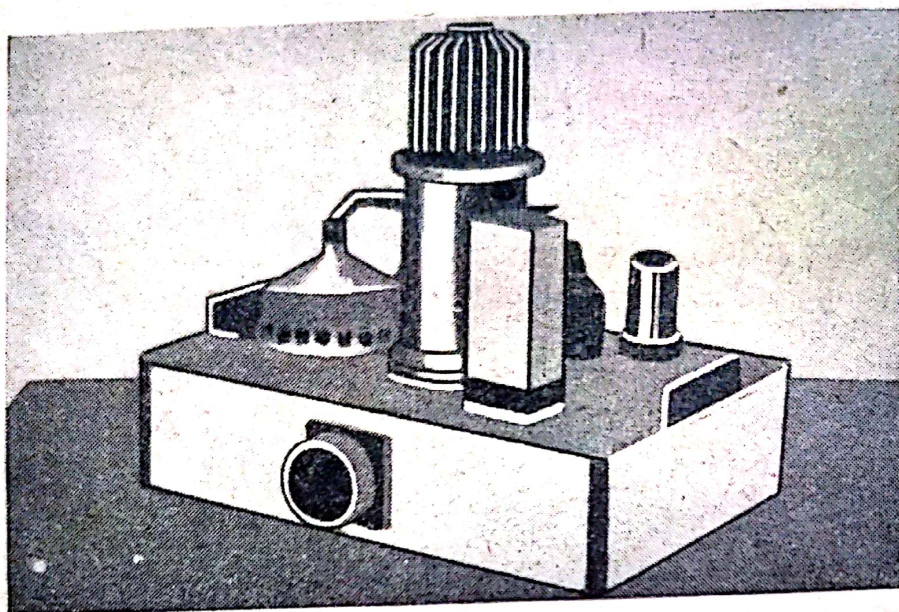


Fig. 60. Higrometru cu condensare

electronice — diodele semiconductoare și tranzistoarele cu germaniu — funcționează sigur numai într-un interval de temperaturi determinat; de la —50 pînă la +60°C. Sub —50°C și peste +60°C parametrii lor se înrăutățesc brusc. Referitor la această particularitate a dispozitivelor cu germaniu, apare necesitatea păstrării lor la o temperatură constantă, ceea ce se realizează menținînd într-un anumit volum o temperatură strict constantă în cazul unor variații de temperatură considerabile ale mediului înconjurător, într-un sens sau în celălalt. Dacă în volumul unde se găsește instalația radiotehnică cu dispozitive cu germaniu este necesar să se mențină o temperatură care depășește temperatura mediului ambiant, aceasta se realizează suficient de simplu prin intermediul unor sisteme termoregulatoare obișnuite. În cazul cînd este însă necesar să se asigure o temperatură constantă cu condiția că temperatura mediului înconjurător poate fi sau mai mare, sau mai mică decît temperatura dată a volumului, nici unul dintre sistemele existente nu pot rezolva această problemă pe o cale simplă și ușoară. Soluția cea mai rațională constă în folosirea metodei termoelectrice.

La Institutul de semiconductoare au fost elaborate mai multe tipuri de asemenea aparate, care asigură o temperatură constantă pentru variaţii care ajung pînă la 50°C ale temperaturii mediului ambiant.

Termostatul cu semiconductoare (fig. 61) se deosebeşte în principiu puţin de construcţia unui microfrigider. Se adaugă numai un singur element nou, un termoregulator, care — în funcţie de temperatura volumului şi prin intermediul unui releu — inversează sensul curentului în termobaterie; datorită acestui fapt, volumul său se încălzeşte, sau — dimpotrivă — se răceşte.

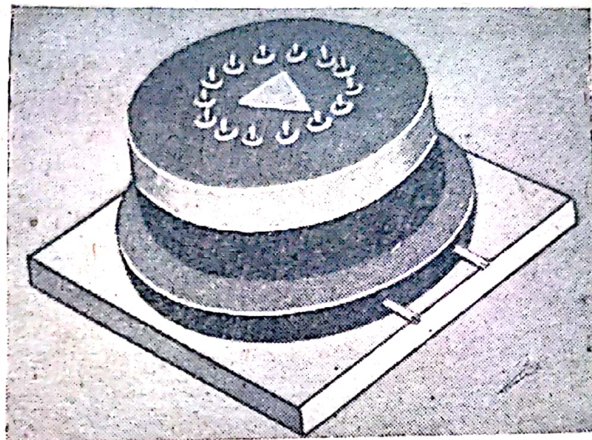


Fig. 61. Microtermostat pentru diodele şi trnazistoarele de germaniu

Acest procedeu permite să se menţină în termostat o temperatură constantă cu eroarea pînă la o sutime de grad. ceea ce dă posibilitatea să se utilizeze instalaţii termoelectrice pentru păstrarea oricăror obiecte, la temperatură constantă, inclusiv cristale de cuarţ pentru stabilizarea frecvenţei, care necesită o temperatură riguros constantă.

In instalaţiile de vid moderne, în cavitatea vidată se obţine o rarefiere înaintată a aerului prin funcţionarea simultană a două tipuri de pompe: una pentru vid preliminar, şi alta pentru vid înaintat, şi prin folosirea obligatorie a unor dispozitive speciale, care au căpătat denumirea de capcane. Pompa de vid înaintat, cu jet de vapori de ulei, intră în funcţiune atunci cînd s-a creat deja un vid preliminar de ordinul a 10^{-3} mm Hg. După ce s-a obţinut rarefierea preliminară necesară, se pune în funcţiune pompa de vid înaintat, care funcţionează cu un ulei special. Prin funcţionarea simultană a acestor două pompe se poate obţine în cavitate vidul necesar. Gradul de rarefiere înaltă, dacă în sistem nu există scurgeri, este însă limitat de o serie întreagă de factori, în special de presiunea vaporilor de ulei. Cele mai bune sorturi de ulei pentru vid înaintat au, la temperatura camerei, o presiune a vaporilor de circa 10^{-7} mm Hg. Uleiurile obişnuite folosite în pompele metalice cu jet de vapori, de fabricaţie sovietică, posedă o valoare a presiunii vaporilor de cel

puţin 10 ori mai mare. Obţinerea unui vid mai înaintat decît presiunea indicată a vaporilor de ulei necesită din această cauză folosirea unor capcane care împiedică pătrunderea vaporilor de ulei în volumul vidat. Există diferite tipuri de capcane, a căror construcţie se bazează pe diverse principii. Cea mai largă răspîndire au căpătat-o însă capcanele cu răcire. În aceste capcane, confecţionate sub forma unor recipiente cu pereţi dubli se toarnă aer lichid, oxigen lichid sau azot lichid, datorită cărui fapt pereţii capcanei capătă o temperatură extrem de scăzută. Capcana se conectează în circuitul sistemului de vidare şi se aşază între cavitatea supusă vidării şi pompa de vid înaintat. De aceea, cînd vaporii de ulei migratori ajung la peretele capcanei, ei se condensează şi, în consecinţă, nu pătrund în spaţiul care trebuie vidat.

Ideea pe care se bazează construcţia capcanelor este simplă şi acestea funcţionează sigur. Totuşi, pe lîngă avantajele evidente ale unor asemenea aparate, ele au şi unele lipsuri. Astfel, de exemplu, cînd se lucrează cu pompe de vid preliminar cu ulei, confecţionate din sticlă, nu se recomandă ca să se toarne în capcane oxigen lichid sau aer lichid, deoarece acest fapt prezintă anumite pericole. Dacă, dintr-o cauză oarecare, capcanele se fisurează şi oxigenul se amestecă cu uleiul, are loc o explozie. În plus, nu întotdeauna şi pretutindeni pot sta la dispoziţie lichidele menţionate.

Capcana cu răcire termoelectrică, realizată la Institutul de semiconductoare este în mare măsură lipsită de aceste dezavantaje.

Constructiv, capcana termoelectrică este confecţionată sub forma unei monturi metalice cilindrice, care — cu ajutorul a două flanşe şi al unor garnituri de plumb — se racordează la pompă şi la cavitatea supusă vidării. Aspectul general al capcanei este arătat în fig. 62, *a*.

Elementul principal care asigură crearea unei temperaturi scăzute este o baterie termoelectrică ale cărei lipituri reci vin în contact cu plăcuţele de condensare, iar lipiturile calde vin în legătură cu carcasa capcanei (fig. 62, *b*). După cum rezultă din fig. 62, carcasa — prin urmare şi lipiturile calde ale termobateriei — sînt răcite cu apă curgătoare care circulă printr-o cămaşă. Plăcuţele, în număr de 13, sînt aşezate înclinat, cu scopul ca moleculele migratoare ale vaporilor de ulei să sufere o reflexie multiplă, înainte ca o parte oarecare din ele — neînsemnată — să reuşească să pătrundă în cavitatea supusă vidării. Prin intermediul bateriei cu semicon-

ductoare, temperatura plăcuţelor este micşorată pînă la aproximativ — 30°C dacă temperatura aerului înconjurător este de circa 20°C.

Combinarea temperaturii relativ scăzute a ecranelor cu amplasarea lor spaţială, care condiţionează o reflexie şi o condensare eficace a vaporilor de ulei, face ca migrarea lor în cavitatea supusă vidării să se micşoreze considerabil, prin urmare se măreşte în mod corespunzător gradul de rarefiere.

Pentru a se micşora temperatura ecranelor pînă la valoarea necesară, trebuie ca prin bateria termoelectrică să treacă un curent continuu cu intensitatea de 10—12 A, la o tensiune de 0,6—0,8 V. Prin urmare, pentru alimentarea ei, bateria absoarbe o putere de circa 10 W. Dacă în laborator nu există o sursă de curent continuu, se poate folosi un redresor standard cu seleniu, de tip BCA-10.

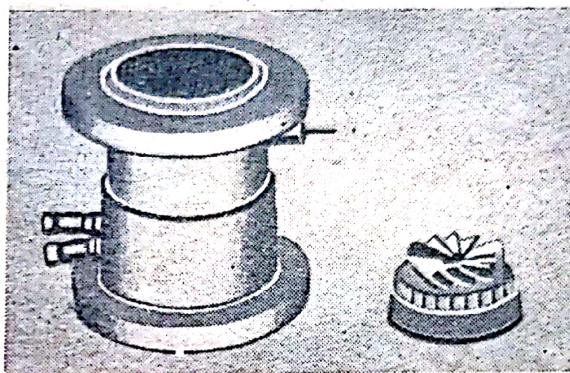


Fig. 62. Capcană termoelectrică pentru instalaţii de vid înaintat:
a — aspectul general al capcanei, *b* — baterie termoelectrică cu plăcuţe reflectoare care se înşurubează în capcană

Se înţelege de la sine că în acest paragraf nu au fost descrise nici pe departe toate tipurile şi construcţiile de instalaţii frigorifice cu semiconductoare, ale căror proprietăţi remarcabile au fost deja confirmate de însăşi practica.

15. INCĂLZIREA TERMOELECTRICĂ

In cazul efectului Peltier, la trecerea curentului printr-un sistem de elemente semiconductoare neomogene, unele lipituri se răcesc, în timp ce altele se încălzesc. Această proprietate importantă, după cum am văzut, poate fi folosită cu succes pentru obţinerea pe calle termoelectrică a frigului. Pe de altă parte, prin intermediul aceluiaşi efect Peltier se poate dobîndi căldură în locul frigului. In adevăr, dacă o baterie termoelectrică se construieşte în aşa fel încît lipiturile care se încălzesc să fie introduse în interiorul unei încăperi, iar cele care se răcesc să fie scoase în exterior, în timpul trecerii unui curent continuu prin acest sistem, încăperea se va

încălzi pe seama energiei termice a aerului exterior, adică prin răcirea „străzii".

La prima luare de contact cu această idee s-ar putea crede că ea prezintă interes numai pentru autorul unei povestiri sau al unui roman ştiinţifico-fantastic şi că nu are nici o valoare ştiinţifică şi cu atît mai mult practică. Sînt adevărate oare aceste păreri? Fireşte, nu sînt adevărate. Ideea remarcabilă a folosirii efectului Peltier pentru încălzirea încăperilor, emisă pentru prima dată de academicianul A. F. Ioffe, se bazează pe legile riguroase ale termodinamicii. A. F. Ioffe şi-a dezvoltat ideea într-o teorie pe care a expus-o în cartea „Bazele energetice ale bateriilor termoelectrice din semiconductoare".

Pentru a ilustra cît este de raţională utilizarea efectului Peltier pentru încălzirea încăperilor, vom face cîteva calcule extrem de elementare. Pentru simplificare să examinăm un circuit alcătuit din trei bare semiconductoare: una cu goluri, una electronică şi iarăşi una cu goluri, conectate în serie (fig. 63). Pentru un sens oarecare al curentului, temperatura primei lipituri va fi T_1, iar a celei de-a doua T_2. Fie $T_1 > T_2$. La trecerea curentului prin acest sistem, în prima lipitură se degajează o cantitate oarecare Q_1 de energie termică, iar de la cea de-a doua lipitură se ia o cantitate oarecare Q_2 de energie termică. Q_1 şi Q_2 nu sînt egale una cu alta. Această inegalitate este condiţionată de faptul că căldura rezultată din efectul Peltier este proporţională cu temperatura absolută a lipiturii. De aceea, $Q_1 > Q_2$.

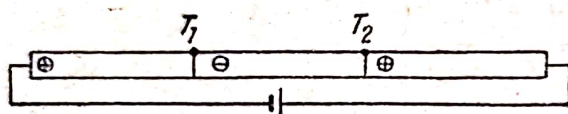


Fig. 63. Circuit termoelectric alcătuit din trei elemente semiconductoare: cu goluri, electronic şi din nou cu goluri

În consecinţă, în lipitura caldă se degajează $Q_1 - Q_2 = P$ mai multă căldură decît se preia de la lipitura rece. Acest surplus de energie P apare din cauza energiei electrice a curentului.

Din însuşi sensul procesului reiese că $P < Q_1$ în raportul

$$\frac{P}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Însă

$$Q_1 = A\,T_1$$

și

$$Q_2 = A T_2 ,$$

unde A este un coeficient de proporționalitate. În acest caz

$$Q_1 - Q_2 = A (T_1 - T_2).$$

Împărțind partea stîngă a ultimei expresii cu Q_1, iar pe cea dreaptă — cu AT_1, vom obține:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} .$$

În consecință,

$$\frac{P}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} .$$

Să înlocuim în această expresie cîteva cifre concrete. Să presupunem că temperatura lipiturii calde este $T_1 = 290°K$, iar temperatura lipiturii reci $T_2 = 260°K$. Atunci $P/Q_1 \cong 1/10$. Aceasta înseamnă că la o temperatură de 17°C (290°K) a încăperii, numai 1/10 din energia termică degajată la lipitură va fi furnizată de curentul electric, în timp ce 9/10 din energie va proveni din rezervele de căldură ale aerului rece din exterior. Din aceste calcule absolut elementare, rezultă clar că încălzirea termoelectrică a unei încăperi reprezintă un sistem avantajos din punct de vedere economic. Ce e drept, în toate aceste calcule este necesar să se introducă o corecție considerabilă, deoarece ele se bazează pe ipoteza că toate fenomenele fizice din încălzitorul termoelectric sînt reversibile. De fapt, însă, în natură nu există procese reversibile și fiecare proces este însoțit de pierderi de neînlocuit. Dar, chiar dacă s-ar ține seama de toate pierderile ireversibile care au loc într-o baterie termoelectrică, totuși din punctul de vedere al economiei de energie absorbită, încălzirea încăperilor cu ajutorul semiconductoarelor prezintă un interes neîndoielnic.

Toate acestea au însă și un alt aspect. La inversarea sensului curentului electric, lipiturile interioare se vor încălzi, iar cele exterioare se vor răci. Prin urmare, bateria de semiconductoare va permite să se regleze temperatura încăperii în modul care este cel mai de dorit și mai comod. Cu ajutorul ei, în zilele calde de vară vom putea produce răcoare în camerele noastre, iar iarna le vom putea încălzi.

Apar însă imediat următoarele întrebări cu totul legitime: ce sens au toate acestea? Nu este oare mai simplu să se încălzească încăperea prin metodele anterioare? Ce avantaje posedă această nouă metodă?

Toate aceste probleme, precum și altele care pot apărea, se bazează în esență pe sensul fizic al încălzirii termoelectrice, care constă în următoarele: consumînd o cantitate de energie electrică de cîțiva kilowați-ore, semiconductoarele permit să se realizeze un proces datorită căruia în încăpere sosește o cantitate de energie termică de cîteva ori mai mare, extrasă din rezervele de căldură ale aerului rece exterior. De aici trebuie să rezulte clar că încălzirea termoelectrică este excepțional de avantajoasă din punct de vedere economic, „randamentul" unei asemenea instalații depășind 100%. Cuvîntul randament l-am pus în ghilimele pentru ca în mintea cititorului să nu se ivească o confuzie. Este vorba aici nu despre randamentul în sensul obișnuit al cuvîntului, care reprezintă raportul dintre puterea obținută și cea absorbită și care niciodată nu poate fi mai mare decît 100%. Aici este vorba despre eficacitatea procesului de „pompare" a energiei termice a aerului înconjurător, prin absorbirea unei cantități mai mici de energie electrică. După cum se știe, energia termică prin ea însăși nu poate trece de la un corp mai puțin încălzit la altul mai încălzit. Pentru ca să fie totuși posibilă această trecere, este necesar să se creeze o instalație specială și să se absoarbă o cantitate oarecare de energie. Și iată că această instalație este tocmai bateria din elemente semiconductoare electronice și cu goluri, conectate în serie. Natural, se pot crea și alte instalații, alcătuite conform unui principiu absolut diferit, și care de asemenea să „transfere" energia termică de la un corp rece la unul cald, dar în cazul concret examinat vorbim numai despre folosirea în acest scop a efectului Peltier și a bateriei termoelectrice cu semiconductoare.

Au fost create în prezent baterii de acest fel? Deocamdată, încă nu. Nivelul actual al tehnologiei semiconductoarelor permite pentru moment să se creeze numai instalații frigorifice care funcționează sigur, dar nu dă încă posibilitatea să se obțină termoelemente cu caracteristicile termotehnice necesare. Fizicienii, chimiștii și termotehnicienii trebuie să se mai străduiască încă foarte mult înainte de a-și atinge scopul propus. A. F. Ioffe a încercat să privească înainte și să apre-

cieze rolul semiconductoarelor în progresul tehnic. Abordînd problemele termoelectricităţii el a scris următoarele în unul din articolele sale: „Acum 25 ani semiconductoarele au pătruns pentru prima dată în electrotehnică împreună cu metalele. Atunci, la începutul primului cincinal, am emis ipoteza că termoelementele din semiconductoare sînt capabile să transforme 3—4% din energia termică direct în energie electrică şi că sistemul socialist de economie naţională va crea condiţiile necesare pentru aceasta.

Multora, aceasta li s-a părut atunci ceva fantastic. Chiar unele ziare au avut o atitudine sceptică. În prezent, aceste aşteptări au fost deja depăşite de practică şi aş dori să schiţez etapa ulterioară a pătrunderii semiconductorilor în viaţa noastră de toate zilele şi în economia noastră naţională.

Să ne închipuim că trăim peste cîţiva ani, sau chiar peste unul, două decenii şi vom vedea că termoelementele semiconductoare alimentează industria cu energie electrică, obţinută fără intermediul maşinilor, direct de la căldura unui focar. Încălzirea centrală a clădirilor noastre va furniza suplimentar, fără cheltuieli, energia electrică în cantităţi care vor asigura energia electrică necesară tuturor nevoilor casnice.

Ulterior, încălzirea centrală va ceda locul bateriilor termoelectrice, care vor produce aer cald în timpul iernii şi aer rece în timpul verii, menţinînd automat temperatura din încăperi la nivelul dorit.

Toate tipurile de mijloace de transport, trenuri, automobile, vapoare, poate şi avioanele, vor fi alimentate cu energie electrică obţinută de la termoelemente.

Ideea lui Mendeleev referitoare la gazeificarea subterană îşi va găsi rezolvarea naturală cu ajutorul termoelementelor.

Aceleaşi termoelemente semiconductoare vor crea frigul şi în frigiderele casnice, la transportul şi păstrarea produselor uşor alterabile etc.

Pretutindeni unde există în natură sau în producţie surse de căldură, ele vor produce energie electrică. Peste tot unde există energie electrică se va putea crea căldură sau frig şi va fi posibil să se realizeze orice procese de producţie. Va sosi epoca electrificării totale la oraşe şi sate. Producerea de energie electrică nu va necesita maşini complicate şi costisitoare".

ÎNCHEIERE

În capitolele precedente ale acestei cărţi s-a arătat într-o oarecare măsură rolul semiconductoarelor în ştiinţa şi tehnica modernă. Nu se poate să nu menţionăm însă că tema principală a acestei cărţi nu a fost de loc epuizată în întregime; rolul şi locul semiconductoarelor în viaţa noastră de toate zilele sînt fără îndoială mai însemnate. Ca exemplu se poate arăta că în tehnică se folosesc pe scară largă aşa-numitele materiale seignetto-electrice, substanţe semiconductoare cu constantă dielectrică mare, a cărei valoare ajunge pînă la cîteva mii.

Descoperirea de către fizicianul sovietic B. M. Vul a proprietăţilor seignetto-electrice ale titanului de bariu au extins încă şi mai mult posibilităţile materialelor seignetto-electrice folosite pentru fabricarea condensatoarelor care posedă o capacitate considerabilă şi au dimensiuni mici.

O importanţă tot aşa de mare pentru tehnică au materialele piezoelectrice, cristale semiconductoare care posedă proprietăţi remarcabile. Dacă un cristal piezoelectric este comprimat sau alungit, pe faţetele lui vor apărea sarcini electrice de semne opuse. Dimpotrivă, dacă cristalul piezoelectric este aşezat într-un cîmp electric exterior, el se va deforma. Prin urmare, în anumite condiţii, un material piezoelectric permite să se realizeze transformarea energiei mecanice direct în energie electrică şi a energiei electrice în energie mecanică. Materialele piezoelectrice au căpătat numeroase aplicaţii. Pe baza lor se construiesc instalaţii cu ultrasunete care generează şi recepţionează unde ultrasonore. Un cristal piezoelectric de dimensiuni mici serveşte drept element principal în dozele de picup piezoelectrice, în difuzoare, în defectoscoape cu ultrasunete etc.

În multe aparate electronice cu vid, una dintre piesele principale este catodul care se găseşte la un potenţial negativ şi emite electroni care sînt apoi acceleraţi de un cîmp electric. Pentru ca să emită electroni, catodul trebuie să fie incandescent. De temperatura catodului depinde intensitatea fasciculului de electroni. Este extrem de important ca la intensitatea

dată a fasciculului de electroni să se poată micşora temperatura catodului cît mai mult posibil. În primul rînd, aceasta duce la creşterea randamentului întregului aparat, deoarece se micşorează puterea absorbită pentru încălzire. În al doilea rînd, durata de serviciu a catodului se lungeşte. Acest scop este atins acoperind suprafaţa catodului metalic cu un strat subţire semiconductor, datorită căruia lucrul de ieşire al electronilor din metal se micşorează şi catodul poate emite numărul necesar de electroni chiar la o temperatură mai scăzută.

Transmiterea energiei electrice de înaltă frecvenţă se realizează prin intermediul ghidurilor de unde care sînt nişte conducte metalice. Pentru măsurarea puterii transmise se folosesc atenuatoare, numite altfel şi dispozitive absorbante. După cum arată şi denumirea lor, dispozitivele absorbante absorb parţial sau chiar în întregime puterea incidentă. Această funcţiune importantă, după cum s-a observat, poate fi îndeplinită numai de atenuatoare confecţionate din substanţe semiconductoare speciale.

În unele cazuri, în tehnică se folosesc redresoare de curent cu ignitroane; unul dintre elementele componente principale ale unui ignitron este electrodul de aprindere care pune în funcţiune tubul. Pentru ca un asemenea tub redresor să poată funcţiona, este necesar ca electrodul de aprindere (igniterul) să fie făcut dintr-un material semiconductor. În mod obişnuit, se foloseşte în acest scop carbură de bor sau carbură de siliciu cu diferite adaosuri.

Pentru măsurarea tensiunilor mecanice se utilizează diferite dispozitive, însă toate au anumite dezavantaje. De aceea, în unele cazuri este raţional ca pentru scopul amintit să se folosească tensometre cu semiconductoare, care reprezintă rezistenţe de volum cuprinse între doi electrozi purtători de curent. În cazul unei variaţii a sarcinii, rezistenţa tensometrului se modifică şi variaţia este înregistrată de un aparat de măsurat electric corespunzător.

Un rol aparte joacă semiconductoarele în industria chimică, unde ele sînt folosite drept catalizatori pentru multe reacţii chimice. Nu este întîmplător faptul că foarte recent a apărut o nouă ramură independentă a chimiei fizicale: cataliza prin intermediul semiconductoarelor.

Pe măsura dezvoltării celor mai diverse ramuri ştiinţifice şi tehnice devine din ce în ce mai necesară introducerea fie a materialelor semiconductoare, fie a aparatelor cu semiconductoare. Această necesitate apare datorită faptului că semi-

conductoarele nu numai că simplifică rezolvarea unei probleme oarecare, dar în unele cazuri soluţionarea unei anumite probleme este posibilă numai cu ajutorul lor. Dacă în prezent, la nivelul actual al tehnicii, putem vorbi cu deplină certitudine despre perspectivele colosale ale electronicii semiconductoarelor, acest fapt este cu atît mai justificat, cu cît şi ştiinţa despre semicondutoare nu rămîne pe loc, ci progresează neîncetat. Se perfecţionează metodele de cercetare, apar noi idei, se descoperă noi fapte experimentale şi se fac noi descoperiri. Analiza cea mai moderată şi mai prudentă, bazată pe realizările care există deja în prezent, permite să se prevadă cu tărie progresul rapid al cunoştinţelor noastre ulterioare, mai profunde, despre semiconductoare. Pătrunzînd din ce în ce mai adînc în tainele proprietăţilor materiei, cercetătorii învaţă să le stăpînească pe deplin şi se apropie din ce în ce mai repede de ţelurile propuse.

BIBLIOGRAFIE

А. Ф. Иоффе. Полупроводники и их применение, Изд-во Акад. наук СССР, 1956,
А. Ф. Иоффе. Полупроводники и их применение, Изд-во «Знание», 1956.
Э. И. Адирович. Электрическое сопротивление твердых тел, Изд-во «Знание», 1953.
Б. М. Бул. Сегнетоэлектричество, Изд-во Акад. наук СССР, 1956.
М. С. Соминский. Полупроводники и их применение, Госэнергоиздат, 1955.
М. С.Соминский. Полупроводники, Изд. ЛДНТП, 1957.
Н. Я. Пу.мпер. Лристалические диоды и триоды, Госэнергоиздат, 1953.
А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников, Изд-во Акад. наук СССР, 1957.
А. Ф. Иоффе. Полупроводниковые термоэлементы, Изд-во Акад. наук СССР, 1956.
А. Ф. Иоффе, Л. С. Стильбанс, Е. К. Иорданишвили, Т. С. Ставицкая. Термоэлектрическое охлаждение, Изд-во Акад наук СС.СР 1956. странной литературы, 1956.
А. Коблени и *Г. Оуэнс.* Транзисторы, Теория и применения, Изд-во ино- ЛДНТП, 1956.
Ф. Ф. Волькенштейн. Полупроводники как катализаторы химических реакций, Изд. ЛДНТП, 1956.
И. Х. Геллер и *С. С. Мескин.* Полупроводниковые выпрямители, Изд. ЛДНТП, 1957.
Д. Н. Мирлин. Полупроводниковые болометры, Изд. ЛДНТП, 1957.
А. Г. Остроумов. Пьезоэлектрики, Изд. ЛДНТП, 1957.
В. П. Жузе и *А. Р. Регель.* Технические применения эффекта Холла. Изд. ЛДНТП, 1957.
М. С. Соминский. Вентильные фотоэлементы, Изд. ЛДНТП, 1957.
Г. А. Смоленский и *В. А. Исупов.* Сегнетоэлектрики, Изд. ЛДНТП, 1957.
В. К. Субашиев. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии, Изд. ЛДНТП, 1957.
В. К. Субашиев. Кристаллические диоды и триоды, Изд. ЛДНТП. 1957.
М. С. Соминский. Фотосопротивления, Изд. ЛДНТП, 1957.
С. С. Шалыт. Электрические свойства полупроводников. Изд. ЛДНТП. 1957.
И. Т. Шефтель. Термосопроти.вления, Изд. ЛДНТП, 1957.
Полупроводники в науке и технике, под редакцией акад. А. Ф. Иоффе, т. i, Изд-во Акад. наук СССР, 1957.
Г. А. Смоленский и *А. Г. Гуревич.* Ферриты, Изд. ЛДНТП, 1957.

TABLA DE MATERIE

Redactor-responsabil de carte: Ing. M. Varia

Dat la cules 25.06.1959. Bun de tipar 21.07.1959. Hîrtie cărți școlare de 65 g/m², 61×86/16. Coli editoriale 10. Coli tipar 10,5 Comanda TU 4971 A. 04519. E. 20336. Indicele de clasificare pentru bibliotecile mari 621.315.59
Indicele de clasificare pentru bibliotecile mici 621.

Tiparul executat sub comanda nr. 1964 la Intreprinderea Poligrafică „13 Decembrie 1918", str. Grigore Alexandrescu nr. 93—95, București — R.P.R.

ERATĂ

Pag.	Rîndul	În loc de	Se va citi	Din vina
4	17	$6{\cdot}6{\cdot}10^5\Omega^{-3}cm^{-1}$	$6{\cdot}6{\cdot}10^5\Omega^{-1}cm^{-1}$	Editurii
12	13,21	Σ	ε	,,
99	fig. 31	carbură de siliciu	sulfură de cadmiu	,,

C. 1964